

**FORSTLICHE  
FORSCHUNGSBERICHTE  
MÜNCHEN**

**Dynamische Windbelastung  
von Nadelbäumen**

von  
**Richard Amtmann**

SCHRIFTENREIHE DER FORSTWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT  
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN UND DER  
BAYER. FORSTLICHEN VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT





Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41555215\\_0038](https://archive.org/details/IA41555215_0038)



Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Forstwissenschaftlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von  
Richard Amtmann

München 1986

1. Gutachter: em. Prof. Dr. Dr. h.c. A. Baumgartner

2. Gutachter: Prof. Dr. F. Franz

Tag der mündlichen Prüfung: 29. 7. 1986

## Vorwort

Dem Ordinarius für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Ludwig-Maximilians-Universität München, Herrn Prof. Dr. A. Baumgartner, danke ich für die Förderung dieser Arbeit und die Möglichkeit, sie an seinem Lehrstuhl anfertigen zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Dr. habil. H. Mayer für seine stete Diskussionsbereitschaft und die vielen aufschlußreichen Ratschläge während der Durchführung der Arbeit. In diesem Zusammenhang ist seine Einweisung in die, von ihm zusammengestellte Meßanordnung zur Erfassung windinduzierter Biegeschwingungen von Bäumen hervorzuheben.

Für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen bin ich den Herren W. Hirner und H. Knötig vom Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie sehr zu Dank verpflichtet. Ohne ihre Hilfe wären die Arbeiten im Freiland nicht möglich gewesen.

Für die gute Zusammenarbeit danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie, insbesondere Frau C. Mooslechner, die in exakter Weise die Reinzeichnung der Abbildungen dieser Arbeit vornahm, und Herrn Dipl.-Met. U. Teichmann, für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Außerdem danke ich den Leitern des FA München-Süd, Herrn FDir. Dr. Schmidt, und des FA Sauerlach, Herrn FDir. Dr. Baumgartner, für die Bereitstellung der Versuchsflächen im Bereich ihrer Forstämter.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die Bereitstellung der benutzten Meßanordnung im Rahmen der Projekte Ma 749/4 und Ma 749/5 gedankt. Außerdem danke ich der Bayerischen Staatsforstverwaltung für die Übernahme der angefallenen Rechnerkosten an der Rechenanlage des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

## Inhalt

|                                                           | Seite |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| <u>Vorwort</u>                                            | I     |
| <u>Inhalt</u>                                             | II    |
| <u>Zusammenfassung</u>                                    | IV    |
| <u>1 Einleitung</u>                                       | 1     |
| <u>2 Statistische und elastomechanische Grundlagen</u>    | 4     |
| 2.1 Statistische Grundlagen                               | 4     |
| 2.1.1 Zufallsgrößen                                       | 4     |
| 2.1.2 Zeitreihen                                          | 5     |
| 2.2 Elastomechanische Grundlagen                          | 8     |
| 2.2.1 Balkenschwingungen                                  | 9     |
| 2.2.2 Materialeigenschaften                               | 11    |
| <u>3 Windverhältnisse in und über Pflanzenbeständen</u>   | 13    |
| 3.1 Vertikales Windprofil                                 | 13    |
| 3.2 Turbulenzkenngrößen                                   | 23    |
| 3.3 Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponenten  | 32    |
| <u>4 Aufbau und Stabilität von Nadelbäumen</u>            | 38    |
| 4.1 Mechanische Schaftformtheorie                         | 38    |
| 4.2 Mechanische Eigenschaften des Baumschaftes            | 41    |
| 4.3 Mechanische Eigenschaften der Baumkrone               | 45    |
| 4.4 Wurzelung und Boden                                   | 52    |
| 4.4.1 Wurzelung der Fichte                                | 53    |
| 4.4.2 Wurzelung der Kiefer                                | 54    |
| 4.4.3 Wurzelbeanspruchungen durch Einwirkungen des Windes | 56    |
| <u>5 Windbelastung von Bäumen</u>                         | 60    |
| 5.1 Allgemeines                                           | 60    |
| 5.2 Spektralmethode                                       | 62    |
| 5.3 Belastung in der mittleren Windrichtung               | 63    |
| 5.4 Belastung quer zur mittleren Windrichtung             | 69    |
| <u>6 Experimentelle Untersuchungen</u>                    | 76    |
| 6.1 Versuchsflächen                                       | 76    |

|                                                                              | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 6.2 Meßsysteme                                                               | 77    |
| 6.2.1 Windmeßgeräte                                                          | 78    |
| 6.2.2 Baumschwingungsaufnehmer                                               | 82    |
| 6.3 Datenerfassung und -aufbereitung                                         | 85    |
| 6.4 Übersicht über die Messungen                                             | 89    |
| <u>7 Windmessungen</u>                                                       | 91    |
| 7.1 Wetterlagen und mittlere Windverhältnisse                                | 91    |
| 7.2 Momente und Häufigkeitsverteilungen der Windvektor-<br>komponenten       | 95    |
| 7.3 Turbulenzkenngrößen                                                      | 97    |
| 7.4 Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponen-<br>ten                | 105   |
| 7.5 Schubspannung                                                            | 120   |
| <u>8 Baumschwingungsmessungen</u>                                            | 131   |
| 8.1 Charakterisierung der Versuchsbäume                                      | 131   |
| 8.2 Häufigkeitsverteilungen und statistische Momente<br>der Baumauslenkungen | 138   |
| 8.3 Spektren der Fluktuationen der Baumauslenkungen                          | 147   |
| <u>9 Ergebnisse der Spektralmethode</u>                                      | 162   |
| <u>10 Schlußfolgerungen</u>                                                  | 174   |
| <u>Literatur</u>                                                             | 176   |
| <u>Verzeichnis der Abbildungen</u>                                           | 191   |
| <u>Verzeichnis der Tabellen</u>                                              | 197   |
| <u>Verzeichnis der verwendeten Symbole</u>                                   | 202   |
| <u>Anhang</u>                                                                |       |

## Zusammenfassung

Zur Untersuchung der dynamischen Windbelastung von Nadelbäumen sind auf verschiedenen Standorten die Reaktionen ausgewählter Bäume vorwiegend während Sturmlagen erfaßt worden. Eine Bearbeitung dieser Problematik berührt mehrere Fachgebiete, dem bei der Interpretation der durchgeführten Messungen Rechnung getragen werden muß. Im Vergleich zu anderen experimentellen Arbeiten wird dies durch einen relativ umfangreichen theoretischen Teil berücksichtigt. Darauf aufbauend werden im zweiten Teil dieser Arbeit die eigenen experimentellen Untersuchungen diskutiert.

Nach einem kurzen Überblick über das Ausmaß der Sturmschäden in Mitteleuropa sind die zur physikalischen Beschreibung der Sturmgefährdung eines Nadelbaumes notwendigen statistischen und elastomechanischen Grundlagen im Abschnitt 2 zusammengestellt. Im anschließenden Abschnitt wird das bodennahe Windfeld und seine Beeinflussung durch landwirtschaftliche Vegetationsformen und Wälder behandelt. Dabei wird zunächst die vertikale Änderung der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit über den Verlauf des vertikalen Windprofils dargestellt. Anschließend werden einige Turbulenzkenngrößen erläutert, die insbesondere in der Gebäudeaerodynamik zur Charakterisierung der dynamischen Windlasten verwendet werden. Im letzten Teil dieses Abschnittes sind die spektralen Eigenschaften der Windturbulenz in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht zusammengestellt. Im Abschnitt 4 sind der Aufbau und die mechanische Stabilität der untersuchten Baumarten Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) näher erläutert. In den ersten drei Teilen des Abschnittes ist dabei versucht worden, die mechanischen Eigenschaften der oberirdischen Baumorgane in einer physikalisch und mathematisch verwendbaren Form darzustellen. Die Verankerung der Bäume im Boden ist im Gegensatz dazu nur über eine qualitative Beschreibung der Wurzelung in Abhängigkeit vom Bodentyp angegeben. Die Windbelastung von Nadelbäumen wird im Abschnitt 5 eingehend diskutiert. Dabei

wird ein Baum durch einen einseitig eingespannten, kreiszylindrischen Stab simuliert, dessen Verhalten in und quer zur mittleren Windrichtung theoretisch abgeleitet wird. Dies wird mit der Spektralmethode durchgeführt, die die Ermittlung der Reaktion eines Körpers auf dynamische Windlasten im Frequenzbereich gestattet.

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit beginnt im Abschnitt 6 mit einer Charakterisierung der eigenen experimentellen Untersuchungen. Neben einer kurzen Beschreibung der Versuchsflächen sind die Eigenschaften der verwendeten Meßsysteme behandelt. Im Anschluß daran werden die Erfassung und Aufbereitung der Meßwerte erläutert und ein Überblick über die in den folgenden Abschnitten näher diskutierten Meßserien gegeben. Der Abschnitt 7 beschäftigt sich mit den Windmessungen. Hier sind zunächst die Großwetterlagen und die mittleren Windverhältnisse auf den Versuchsflächen zusammengestellt. Außerdem werden die Häufigkeitsverteilungen der Windvektorkomponenten in einem strömungsorientierten Koordinatensystem anhand ihrer statistischen Momente erster bis vierter Ordnung diskutiert. Über Turbulenzkenngrößen, die durch einfache Auszählungen bestimmt worden sind, wird die Windböigkeit an der Bestandshöhe eines Fichtenwaldes sowie an Waldrändern quantifiziert. Die spektralen Eigenschaften der Windturbulenz werden über die Spektren der longitudinalen, lateralen und vertikalen Windvektorkomponente abgeleitet, wobei die Lage und Größe ihrer Maxima ausführlich behandelt werden. Im letzten Teil dieses Abschnittes sind die Spektren der Schubspannung enthalten, die als Maß für die auf Nadelbäume wirkenden Windlasten verwendet werden. Die Reaktionen der Versuchsbäume auf dynamische Windlasten in Form von Biegeschwingungen werden im Abschnitt 8 analysiert. Hierzu werden die ausgewählten Versuchsbäume, fünf Fichten (*Picea abies*) und eine Kiefer (*Pinus sylvestris*), kurz charakterisiert. Zur Kennzeichnung der Baumschwingungen sind bei den einzelnen Versuchsbäumen die Stammbeschleunigungen in mehreren Höhen gemessen und anschließend in Auslenkungen umgerechnet worden. Einen ersten Überblick über das Schwingungsverhalten

der ausgewählten Nadelbäume erhält man aus den Häufigkeitsverteilungen der Baumauslenkungen und den Momenten dieser Verteilungen. Aussagekräftiger sind jedoch die Spektren der Komponenten des horizontalen Baumauslenkungsvektors, die im Bereich der Grundswingungsfrequenz des jeweiligen Baumes ein ausgeprägtes Maximum zeigen. Die Grundswingungsfrequenzen sind primär abhängig von der Baumhöhe und liegen im Bereich zwischen 0.2 Hz und 0.3 Hz. Aus den im Abschnitt 9 enthaltenen Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen ist zu entnehmen, daß die Bereiche um die Grundswingungsfrequenzen eine überragende Bedeutung für die Energieübertragung aus dem Windfeld auf einen schwingenden Baum besitzen. Die Parametrisierung dieser Spektren auf der Basis des Verhaltens eines einseitig eingespannten Stabes mit höhenkonstanten Materialeigenschaften zeigt für die untersuchten Fichten im Bereich ihrer Grundswingungsfrequenzen eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischen und aus Messungen ermittelten Spektren.

## 1 Einleitung

Seit frühester Zeit besteht ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Waldes und seiner Nutzung durch den Menschen. Dabei werden Schäden, die durch Naturereignisse wie z.B. Dürre, Schnee oder Sturm hervorgerufen werden, als störend empfunden. Hinweise auf Sturmschäden findet man schon 55 v. Chr. bei Lucretius, der in seinem Buch 'De rerum natura' die den Wald zerstörenden Windböen erwähnte. Auch Tacitus berichtete in seinen Annalen (XVI, 13) über einen Orkan, der im Jahr 66 n. Chr. einen großen Schaden anrichtete.

Mit dem in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts einsetzenden Fichtenanbau (Schmidt-Vogt, 1977), zeichnete sich auch eine grundlegende Änderung der Bewertung der Sturmschäden im Wald ab. In dieser Zeit wurde der Wald zu einem Wirtschaftsfaktor, was eine geregelte Bewirtschaftung voraussetzte, um eine möglichst hohe Leistung des Waldes zu erhalten. Dies führte auch dazu, daß nicht nur die Aufzucht von Beständen, sondern auch ihre Sicherung gegen die natürlich bedingten Schäden eine zunehmende Bedeutung erlangte. Außerdem war es in den Wirtschaftswäldern auch eher möglich, die auftretenden Schäden zu quantifizieren.

Bargmann (1904) hat die Sturmschäden in Deutschland im 19. Jahrhundert zusammengestellt. Er bezifferte den durchschnittlichen jährlichen Schaden in diesem Jahrhundert auf mindestens 350 000 fm Holz, was ungefähr 0.025 fm pro Jahr und Hektar Waldfläche entsprach. Ausführlich wies er auch darauf hin, daß in bestimmten Gebieten die Sturmschäden in einem Jahr um das Zehnfache größer sein können. Über das Ausmaß der Sturmschäden in Süddeutschland zwischen 1953 und 1978 berichtete Maurer (1982). So fielen, durch Stürme bedingt, in Baden-Württemberg und Bayern in diesem Zeitraum pro Jahr durchschnittlich 1 880 000 fm Schadholz an, das sind 14 % des Jahreshiebsatzes. Neben diesen mittleren Aussagen über die Sturmschäden zeigten die Angaben von Kremser (1977) über die Sturmkatastrophe vom

13. November 1972, wie groß ein Schaden sein kann, der durch ein solches säkulares Ereignis hervorgerufen wird. Dieser Sturm allein hat in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt 17 345 000 fm Holz ohne Rinde geworfen oder gebrochen, wobei 91.8 % dieses Schadens in Niedersachsen angefallen sind.

Diese Zahlen zeigten, daß durch die Sturmschäden der Forstwirtschaft ständig große Verluste zugefügt werden. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, daß seit Beginn der geregelten Forstwirtschaft immer wieder Vorschläge zur Verminderung der Sturmschäden gemacht wurden. Schon 1802 beschäftigte sich von Wedell mit den Ursachen von Sturmschäden in Gebirgsforsten und den Möglichkeiten ihrer Verhinderung. Er stellte, wie auch später u.a. Bargmann (1904), Wölffle (1936, 1937 a, b) und Heger (1953), forstliche Eingriffe zur Reduzierung der Sturmschäden im Wald, wie z.B. Baumartenwahl oder Hiebsführung, in den Mittelpunkt seiner Überlegungen. Man erkannte jedoch sehr bald, daß dies allein als Sicherungsmaßnahme nicht ausreichend ist. So setzte sich z.B. Hütte (1967) mit den standörtlichen Voraussetzungen der Sturmgefährdung auseinander, während sich vor allem Fritzsche (1933) und Mayhead et al. (1975) mit den statischen Eigenschaften der Bäume und der dadurch bedingten Windwurfgefahr beschäftigten. Auf den Einfluß der Bodenverhältnisse auf die Sturmgefährdung wiesen u.a. Fraser (1962), Fraser und Gardiner (1967) und Mitscherlich (1974) hin.

Im Rahmen dieser Arbeit soll anhand von Messungen die Belastung von Nadelbäumen durch den Wind, hauptsächlich bei Sturmlagen, untersucht werden. Dazu wird ein Verfahren verwendet, das in der Bauphysik schon lange benutzt wird, um die Belastung von exponierten Bauwerken wie Sendemasten, Wolkenkratzen oder Brücken mit großer Spannweite zu beschreiben. Bei diesem Verfahren wird die Belastung in einen statischen und einen dynamischen Anteil zerlegt, da es sich gezeigt hat, daß die Annahme einer zeitlich konstanten Windbelastung, die durch die mittlere Windgeschwindigkeit hervorgerufen wird, die tatsächliche Belastung nur unzureichend wiedergibt. Vielmehr muß

der dynamische Belastungsanteil, der durch die Turbulenz des Windes verursacht wird, berücksichtigt werden.

## 2 Statistische und elastomechanische Grundlagen

Zur Beschreibung der dynamischen Windwirkung auf Bäume sowie deren Reaktionen darauf sind in diesem Abschnitt die dazu notwendigen Grundlagen zusammengestellt.

### 2.1 Statistische Grundlagen

Die vollständigen Ableitungen und Beweise der im folgenden angeführten Gleichungen sind z.B. in Lumley und Panofsky (1964), Bendat und Piersol (1966) oder Taubenheim (1969) enthalten.

#### 2.1.1 Zufallsgrößen

Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine bestimmte Meßgröße Werte annimmt, die größer oder kleiner als eine vorgegebene Zahl sind, läßt sich durch ihre Verteilungsgesetze angeben. Diese Gesetze sind sowohl in integraler Form, durch die Verteilungsfunktion, wie auch in differentieller, durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, beschreibbar. Bei vielen Problemen benötigt man jedoch nicht die Verteilungsfunktion, sondern es genügen die Momente der Meßgröße, d.h. die mathematischen Erwartungen der entsprechenden Potenzen der Meßgröße.

Das wichtigste Moment ist zunächst das Moment 1. Ordnung  $M_1(0)$ , das den Mittelwert  $\bar{x}$  eines Kollektives von  $N$  Einzelwerten  $x_i$  angibt. Der Querstrich kennzeichnet im folgenden immer den zeitlichen Mittelwert eines Kollektives:

$$M_1(0) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i = \bar{x} \quad (1)$$

Zur weiteren Beschreibung der Verteilung einer Meßgröße ist es vorteilhaft, die höheren Momente auf den Mittelwert des Kollektives zu beziehen. Die so gebildeten Momente heißen Zentralmomente. Zu ihrer Berechnung ist es sinnvoll, die Meßgröße  $x$  zuerst in ihren Mittelwert  $\bar{x}$  und ihre Abweichung vom Mittelwert  $x'$  zu zerlegen:

$$x = \bar{x} + x' \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (2) lassen sich die Zentralmomente 2., 3. und 4. Ordnung nach den folgenden Gleichungen ermitteln:

$$M_2(\bar{x}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i'^2 = \sigma_x^2 \quad (3)$$

$$M_3(\bar{x}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i'^3 \quad (4)$$

$$M_4(\bar{x}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i'^4 \quad (5)$$

Die Gl. (3) liefert die Varianz  $\sigma_x^2$  und damit auch die Standardabweichung  $\sigma_x$ . Zur Charakterisierung der Zentralmomente  $M_3(\bar{x})$  und  $M_4(\bar{x})$  werden die Schiefe  $S$  und die Kurtosis  $K$  verwendet, die nach Gl. (6) und Gl. (7) ermittelt werden können:

$$S = \frac{M_3(\bar{x})}{\sigma_x^3} \quad (6)$$

$$K = \frac{M_4(\bar{x})}{\sigma_x^4} \quad (7)$$

Insbesondere gilt für normalverteilte Kollektive, deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion durch eine zum arithmetischen Mittelwert symmetrische Kurve darstellbar ist, daß die Schiefe  $S=0$  und die Kurtosis  $K=3$  wird (Lumley und Panofsky, 1964).

## 2.1.2 Zeitreihen

Die in dieser Arbeit zu behandelnden Meßgrößen fallen als Zeitreihen an, die im statistischen Sinn als Zufallsprozesse betrachtet werden können. Setzt man für diese Zufallsprozesse Stationarität und Ergodizität voraus, so läßt sich die Autokovarianzfunktion  $R_{xx}(k)$  einer in äquidistanten Zeitabschnitten  $\Delta t$  diskret registrierten Zeitreihe angeben (Walk, 1970):

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=1}^{N-k} x_i' \cdot x_{i+k}' \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

Dabei ist M die maximale Anzahl der Verschiebungen k. Die Fouriertransformierte von  $R_{xx}(k)$  ist das Varianzspektrum, dessen Berechnung mit Gl. (9 a) bis (9 c) möglich ist:

$$P_x(0) = \frac{1}{2 \cdot M} \cdot \{R_{xx}(0) + \sum_{k=1}^{M-1} D(k) \cdot R_{xx}(k)\} \quad (9 \text{ a})$$

$$P_x(hh) = \frac{1}{M} \cdot \{R_{xx}(0) + \sum_{k=1}^{M-1} D(k) \cdot R_{xx}(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot hh \cdot k}{M}\right)\} , \quad (9 \text{ b})$$

$$hh = 1, 2, \dots M-1$$

$$P_x(M) = \frac{1}{2 \cdot M} \cdot \{R_{xx}(0) + \sum_{k=1}^{M-1} D(k) \cdot R_{xx}(k) \cdot (-1)^k\} \quad (9 \text{ c})$$

In Gl. (9 a) bis (9 c) ist  $D(k)$  eine Filterfunktion, die die Fouriertransformation ermöglicht. Hier wurde für  $D(k)$  das von Blackman und Tukey (1958) empfohlene 'hanning'-Filter verwendet, das inzwischen eine weite Verbreitung gefunden hat. Bezüglich der Eigenschaften dieser und anderer Filterfunktionen sei auf die Literatur, z.B. Blackman und Tukey (1958) oder Jenkins und Watts (1968), verwiesen. Mit Gl. (9 a) bis (9 c) sind die spektralen Anteile der Varianz pro Frequenzintervall  $\Delta f(hh)$ , das durch Gl. (10) definiert wird, berechenbar.

$$\Delta f(hh) = \begin{cases} \frac{hh}{2 \cdot M \cdot \Delta t} , & hh = 1, 2, \dots M-1 \\ \frac{1}{4 \cdot M \cdot \Delta t} , & hh = 0, M \end{cases} \quad (10)$$

Wie aus Gl. (10) zu entnehmen ist, wird die Größe des Frequenzintervalls durch die maximale Anzahl der Verschiebungen M und durch die Zeitdifferenz zweier aufeinanderfolgender Meßwerte  $\Delta t$  festgelegt.

Analog zu  $R_{xx}(k)$  lassen sich für zwei Variable x und y die Kreuzkovarianzfunktionen  $R_{xy}(k)$  und  $R_{yx}(k)$  bilden:

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=1}^{N-k} x'_i \cdot y'_{i+k} , \quad k = 0, 1, 2, \dots M \quad (11)$$

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x'_{i+k} \cdot y'_i, \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

Durch Addition bzw. Subtraktion von  $R_{xy}(k)$  und  $R_{yx}(k)$  erhält man den geraden bzw. ungeraden Teil der Kreuzkovarianzfunktion. Eine Fouriertransformation des geraden Teils der Kreuzkovarianzfunktion ergibt das Kospektrum  $Ko_{xy}(f)$ , eine Transformation des ungeraden Teils das Quadraturpektrum  $Qu_{xy}(f)$ . Beide Spektren können zu einer komplexen Größe, dem Kreuzspektrum  $P_{xy}(f)$  zusammengefaßt werden:

$$P_{xy}(f) = Ko_{xy}(f) - i \cdot Qu_{xy}(f) \quad (13)$$

In Gl. (13) bezeichnet  $i$  die imaginäre Einheit ( $i = \sqrt{-1}$ ). Das Frequenzintervall  $\Delta f$  wird hier, wie in der Literatur allgemein üblich, mit  $f$  abgekürzt. Für praktische Probleme erweist es sich häufig als zweckmäßig, das Kreuzspektrum in Exponentialform darzustellen:

$$P_{xy}(f) = |P_{xy}(f)| \cdot \exp(-i \cdot \Theta_{xy}(f)) \quad (14)$$

Aus den angegebenen Gleichungen folgt für den Zusammenhang des Betrages des Kreuzspektrums  $|P_{xy}(f)|$  und des Phasenspektrums  $\Theta_{xy}(f)$  mit dem Ko- und Quadraturpektrum:

$$|P_{xy}(f)| = \sqrt{Ko_{xy}^2(f) + Qu_{xy}^2(f)} \quad (15)$$

$$\Theta_{xy}(f) = \arctan\left(\frac{Qu_{xy}(f)}{Ko_{xy}(f)}\right) \quad (16)$$

Normiert man den Betrag des Kreuzspektrums mit dem geometrischen Mittel der Varianzspektren der beiden Variablen  $x$  und  $y$  in dem betreffenden Frequenzintervall, so erhält man die frequenzabhängige Kohärenz  $Koh(f)$ :

$$Koh(f) = \sqrt{\frac{Ko_{xy}^2(f) + Qu_{xy}^2(f)}{P_x(f) \cdot P_y(f)}} \quad (17)$$

Die Kohärenz kann Werte zwischen Null und Eins annehmen, wobei

eine Kohärenz  $Koh(f)=1$  volle statistische Abhängigkeit und  $Koh(f)=0$  volle statistische Unabhängigkeit bedeuten.

Abschließend seien noch einige wichtige Beziehungen zwischen Varianz  $\sigma_x^2$ , Kovarianzfunktionen  $R_{xx}(k)$  und  $R_{xy}(k)$ , sowie Spektren  $P_x(f)$  angeführt:

$$\int_0^\infty P_x(f) df = R_{xx}(0) = \sigma_x^2 \quad (18)$$

$$R_{xy}(0) = \sigma_{xy} \quad (19)$$

$$R_{xx}(k) \rightarrow 0 \quad \text{für} \quad k \rightarrow \infty \quad (20 \text{ a})$$

$$R_{xy}(k) \rightarrow 0 \quad \text{für} \quad k \rightarrow \infty \quad (20 \text{ b})$$

Durch Gl. (20 a) und (20 b) werden hinreichende Bedingungen dafür angegeben, daß ein stationärer Prozeß ergodisch ist (Gnedenko, 1958). In Gl. (18) und (19) werden Möglichkeiten zur Normierung der Kovarianzfunktionen aufgezeigt, die auch in dieser Arbeit verwendet werden. Bezeichnet man mit  $R'_{xx}(k)$  die mit  $R_{xx}(0)$  normierte Autokovarianz- oder Autokorrelationsfunktion, so gilt immer:  $|R'_{xx}(k)| \leq 1$  (Taubenheim, 1969). Analog gilt für die normierte Kreuzkovarianz- oder Kreuzkorrelationsfunktion  $R'_{xy}(k)$ :  $|R'_{xy}(k)| \leq 1$ . Da im folgenden nur noch die Korrelationsfunktionen benutzt werden, werden zur Vereinfachung der Schreibweise die Hochstriche weggelassen.

## 2.2 Elastomechanische Grundlagen

Das Schwingungsverhalten eines elastischen Körpers läßt sich durch seine Eigenfrequenzen beschreiben. Sie sind typische Systemkennwerte, die durch die Biegefestigkeit, die Verteilung der Masse, sowie die Längenabmessungen bestimmt werden. Insbesondere sind die Eigenfrequenzen unabhängig von den einwirkenden Belastungen (Panggabean, 1978). Für die weiteren Berechnungen wird hier vorausgesetzt, daß Bäume lineare Schwingungen ausführen, was einige vereinfachende Annahmen bei der

Behandlung des Dämpfungs- und Elastizitätsverhaltens der Bäume zuläßt.

### 2.2.1 Balkenschwingungen

Im Hinblick auf die Sturmgefährdung des Waldes kommt bei schwingenden Bäumen den Biegeschwingungen die größte Bedeutung zu (Oliver und Mayhead, 1974; Mayer, 1985). Behandelt man Bäume näherungsweise als eindimensionale elastische Systeme, so gilt für reine Biegeschwingungen die folgende Differentialgleichung (Försching, 1974):

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \cdot (E \cdot J \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2}) + \rho_r \cdot q \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0 \quad (21)$$

Dabei bedeuten E den Elastizitätsmodul des Holzes in Faserrichtung, J das Flächenträgheitsmoment des Baumstammes,  $\rho_r$  die Holzdichte, q die horizontale Querschnittsfläche des Baumstammes, Y die Auslenkung, z die Vertikalkoordinate und t die Zeit. Im Fall eines einseitig eingespannten, homogenen Balkens mit  $E \cdot J = \text{const.}$ , der harmonische Schwingungen der Form  $Y = Y_0 \cdot \cos(2\pi f t)$  ausführt, wird Gl. (21) übergeführt in Gl. (22):

$$\frac{\partial^4 Y}{\partial z^4} = \alpha_n^4 \cdot Y, \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (22)$$

Die charakteristischen Gleichungen zur Berechnung der Eigenwerte  $\alpha_n$  besitzen die Form:

$$\alpha_n^4 = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_n^2 \cdot \frac{\rho_r \cdot q}{E \cdot J}, \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (23)$$

Die Gl. (22) kann dann mit dem folgenden Ansatz gelöst werden (Hearmon, 1966; Försching, 1974):

$$Y_n(z) = C_{1n} \cdot (\cos \alpha_n \cdot z + \cosh \alpha_n \cdot z) + C_{2n} \cdot (\cos \alpha_n \cdot z - \cosh \alpha_n \cdot z) + C_{3n} \cdot (\sin \alpha_n \cdot z + \sinh \alpha_n \cdot z) + C_{4n} \cdot (\sin \alpha_n \cdot z - \sinh \alpha_n \cdot z), \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (24)$$

Die Koeffizienten  $C_{1n}$  bis  $C_{4n}$  in Gl. (24) können aus den Rand-

bedingungen ermittelt werden, die für einen einseitig eingespannten Balken mit der Länge  $l_B$  wie folgt lauten:

Am eingespannten Ende  $z=0$ :  $Y = 0$  ,  $\frac{\partial Y}{\partial z} = 0$

Am freien Ende  $z=l_B$ :  $\frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = 0$  ,  $\frac{\partial^3 Y}{\partial z^3} = 0$

Mit diesen Randbedingungen erhält man für einen einseitig eingespannten Balken die folgende Frequenzgleichung (Försching, 1974):

$$\cos \alpha_n \cdot l_B \cdot \cosh \alpha_n \cdot l_B = -1 \quad , \quad n = 1, 2, \dots \infty \quad (25)$$

Die aus dieser Frequenzgleichung errechneten Werte  $\alpha_n l_B$  und die Eigenfrequenzen  $f_n$  sind in Tab. 1 aufgeführt. Mit bekannt-

Tab. 1: Eigenfrequenzen  $f_n$  (in Hz) und mit der Balkenlänge  $l_B$  (in m) multiplizierten Eigenwerte  $\alpha_n$  (in 1/m) eines einseitig eingespannten Balkens (nach Panggabean, 1978)

|                | 1     | 2     | 3     | 4      | n                                                                  |
|----------------|-------|-------|-------|--------|--------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_n l_B$ | 1.875 | 4.694 | 7.855 | 10.996 | $\approx (n - \frac{1}{2}) \pi$                                    |
| $f_n$          | 0.560 | 3.507 | 9.820 | 19.244 | $((n - \frac{1}{2})^2 \pi^2 \sqrt{EJ / \rho \cdot q}) / (2 l_B^2)$ |

ten Koeffizienten  $C_{1n}$  bis  $C_{4n}$  und den Eigenfrequenzen  $f_n$  sind die Eigenformen des Biegewinkels, des Biegemomentes und der Durchbiegung berechenbar. Letztere können für einen bestimmten Zeitpunkt aus Gl. (26) ermittelt werden, in der C einen allgemeinen Koeffizienten bezeichnet (Hearmon, 1966):

$$Y_n(z) = C \cdot \{ (\cosh \alpha_n \cdot z - \cos \alpha_n \cdot z) - c_n \cdot (\sinh \alpha_n \cdot z - \sin \alpha_n \cdot z) \},$$

$$n = 1, 2, \dots \infty \quad (26)$$

Die Koeffizienten  $c_n$  nehmen dabei folgende Werte an:  $c_1=0.734$ ,  $c_2=1.018$  und  $c_n=1.000$  für  $n>2$ .

## 2.2.2 Materialeigenschaften

Die wichtigsten Materialeigenschaften schwingungsfähiger Körper bei der Berechnung von dynamischen Belastungen sind die Elastizität und die Materialdämpfung. Während die Elastizität einen relativ großen Einfluß auf die Schwingungsperiode eines Körpers ausübt, ist der Einfluß der Dämpfung auf sie im allgemeinen zu vernachlässigen (Panggabean, 1978). Durch die Dämpfung wird ein Teil der Energie des schwingenden Systems vernichtet. Dies bedeutet, daß eine erzwungene Schwingung nur so lange im stationären Zustand verbleibt, wie die abgeführte Dämpfungsenergie durch die vom äußeren Erreger zugeführte Energie ausgeglichen wird.

Betrachtet man, wie eingangs erwähnt, den Baum als ein System, das lineare Schwingungen mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung ausführt, so können diese Schwingungen modellmäßig durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$m \cdot \frac{d^2 Y}{dt^2} + D \cdot \frac{dY}{dt} + k_S \cdot Y = F(t) \quad (27)$$

In Gl. (27) bedeuten  $m$  die Systemmasse,  $Y$  die Auslenkung,  $t$  die Zeit,  $D$  die Dämpfungskonstante,  $k_S$  die Systemsteifigkeit und  $F(t)$  eine zeitabhängige äußere Kraft. Die Systemsteifigkeit  $k_S$  ist ein Maß für die Elastizität des Systems. Bei einer freien Schwingung wird die äußere Kraft  $F(t)$  gleich Null, so daß die Lösung der Gl. (27) lautet:

$$Y(t) = Y_0 \cdot \exp(-\delta t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (28)$$

In Gl. (28) sind mit  $Y_0$  die Schwingungsamplitude  $Y(t)$  zur Zeit  $t=0$ , mit  $f_0$  die Eigenfrequenz des Systems und mit  $\delta$  die Abklingkonstante bezeichnet. Die Abklingkonstante wird durch Gl. (29) definiert (Gerthsen et al., 1974):

$$\delta = \frac{D}{2 \cdot m} \quad (29)$$

Die Eigenfrequenz  $f_0$  des Systems ergibt sich aus Gl. (30):

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_S}{m} - \frac{D^2}{4 \cdot m^2}} \quad (30)$$

Dieses System führt Schwingungen aus, deren Amplituden mit der Zeit auf Null abklingen. Als Spezialfall folgt aus Gl. (30) für die Eigenfrequenz  $f_r$  der freien, ungedämpften Schwingung ( $D=0$ ):

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_S}{m}} \quad (31)$$

Ein häufig verwendetes Maß für die Systemdämpfung ist das logarithmische Dekrement  $\delta T$ , das sich aus dem Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Schwingungsmaxima bestimmen läßt:

$$\frac{Y(t+T)}{Y(t)} = \exp(-\delta T) \quad (32)$$

In Gl. (32) ist  $T$  die Dauer der Eigenschwingung des Systems. Durch Logarithmieren der Gl. (32) und Bildung des Amplitudenverhältnisses nach  $n$  Schwingungsperioden erhält man für das logarithmische Dekrement  $\delta T$ :

$$\delta T = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{Y(t)}{Y(t+T)}\right) \quad (33)$$

Diese Gleichung gestattet es, das logarithmische Dekrement, z.B. aus Zugversuchen, zu errechnen. Eine weitere Möglichkeit, die Dämpfung zu bestimmen, ergibt sich aus der Aufnahme der Resonanzkurve eines schwingenden Systems. Dabei wird zunächst die Amplitude der Resonanzfrequenz  $f_{res}$  ermittelt. Dann bestimmt man die Frequenzen  $f_{un}$  und  $f_{ob}$  unter- bzw. oberhalb der Resonanzfrequenz, bei denen die Amplitude jeweils auf die Hälfte der Amplitude von  $f_{res}$  abgefallen ist. Das logarithmische Dekrement läßt sich dann mit Gl. (34) berechnen (Kollmann und Krech, 1960):

$$\delta T = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_{ob} - f_{un}}{f_{res}} \quad (34)$$

### 3 Windverhältnisse in und über Pflanzenbeständen

Mit den Wechselwirkungen zwischen dem bodennahen Windfeld und den natürlichen Oberflächen beschäftigt sich eine Vielzahl von Untersuchungen. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse eines Teils dieser Untersuchungen zusammengestellt. Einen umfassenderen Überblick über die bestehende Literatur zu dieser Thematik gibt u.a. Jones (1983).

#### 3.1 Vertikales Windprofil

Das vertikale Windprofil beschreibt die Änderung der horizontalen Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Im unteren Teil der bodennahen Atmosphäre, der Prandtl-Schicht, benutzt man in der Meteorologie häufig den folgenden logarithmischen Ansatz, um die mittlere horizontale Windgeschwindigkeit  $\overline{u}_h(z)$  in der Höhe  $z$  anzugeben (z.B. Monin und Yaglom, 1971):

$$\overline{u}_h(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z-d_0}{z_0}\right) \quad z > H \quad (35)$$

Darin bedeuten  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit,  $\kappa$  die von Kármánsche Konstante ( $\kappa \approx 0.40$ ),  $d_0$  die Nullpunktsverschiebung,  $z_0$  den Rauigkeitsparameter und  $H$  die mittlere Baumhöhe des Bestandes, die im folgenden Bestandshöhe genannt wird. Die Gl. (35) gilt nur bei adiabatischer Schichtung und muß bei diabatischen Verhältnissen durch Stabilitätsfunktionen, die von einem Schichtungsparameter wie z.B. der Richardsonzahl abhängen, korrigiert werden (u.a. Busch, 1973; Thom, 1975).

Der Einfluß der Pflanzendecke auf das Windprofil wird durch den Rauigkeitsparameter  $z_0$  und die Nullpunktsverschiebung  $d_0$  berücksichtigt. Bei glatten oder wenig rauen Oberflächen wie Schnee oder Gras wird  $d_0$  im allgemeinen vernachlässigt (Counihan, 1975). Bei einem ca. 30 m hohen Fichtenwald beträgt die Nullpunktsverschiebung jedoch nahezu 2/3 der Bestandshöhe (Jehle, 1968; Baumgartner, 1969; Tajchman, 1972; Mayer, 1976).

Der Rauheitsparameter  $z_0$  ist ein Maß für die aerodynamische Rauheit der Oberfläche. Bei natürlichen Oberflächen nimmt  $z_0$  Werte zwischen 0.01 m für kurzes Gras und 6.00 m für Nadelwälder an (Oke, 1978). Diese Werte resultieren aus der Abhängigkeit des Rauheitsparameters von der Höhe und der Form der Einzelpflanzen, sowie von der Bestandsdichte. Mayer (1976) erhielt für einen Fichtenhochwald einen Rauheitsparameter  $z_0 = 3.1$  m, was ungefähr 1/10 der Bestandshöhe entsprach.

Sind  $d_0$  und  $z_0$  bekannt, so ermöglicht Gl. (35) aus Windprofilmessungen, die bei adiabatischer Schichtung durchgeführt wurden, die Berechnung der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ . Sie kennzeichnet die vorhandene Turbulenz, wobei ihr Wert bei gegebenem Windprofil unabhängig von der Höhe ist (Geiger, 1961). Mit Gl. (36) läßt sich aus  $u_*$  die mittlere Schubspannung  $\bar{\tau}$  berechnen:

$$\bar{\tau} = \rho_1 \cdot u_*^2 \quad (36)$$

In Gl. (36) ist  $\rho_1$  die Luftdichte. Die Bedeutung der Schubspannung wird hier nicht näher diskutiert, da sie u.a. bei Kraus (1970) und Monin und Yaglom (1971) ausreichend angesprochen ist. Auf die Bedeutung von  $\tau$  für die vorliegende Problematik wird in Abschnitt 7.5 ausführlicher eingegangen.

Während die Windverhältnisse über einem Pflanzenbestand durch Gl. (35) ausreichend gut angenähert werden, versagt diese Gleichung im Bestand. Um die Problematik der Charakterisierung der mittleren Windverhältnisse im Bestand aufzuzeigen, werden hier die Ansätze von Landsberg und James (1971) sowie Cionco (1972 b) vorgestellt. In beiden Ansätzen wird die relative Höhe  $z/H$  des Pflanzenbestandes verwendet, die schon Baumgartner (1955) bei der Darstellung seiner Ergebnisse benutzte, um die Eigenschaften verschiedener Vegetationsformen besser vergleichen zu können. So fand Cionco (1972 b) bei Untersuchungen in verschiedenen Maisbeständen, daß die Windprofile gut durch folgende Beziehung angenähert werden können:

$$\overline{u_h}(z) = \overline{u_h}(H) \cdot \exp(A_1 \cdot (\frac{z}{H} - 1)) \quad , \quad 0.1 \cdot H \leq z \leq H \quad (37)$$

In Gl. (37) bezeichnet  $A_1$  eine dimensionslose, empirische Größe, die die Abnahme der Windgeschwindigkeit mit Annäherung an den Boden kennzeichnet und durch folgende Faktoren bestimmt wird (Cionco, 1972 b; Raupach und Thom, 1981):

$$A_1 = (\frac{1}{2} \cdot c_d \cdot LAV \cdot H^3 / l_M^2)^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

Dabei geben  $c_d$  den effektiven Widerstandsbeiwert einer Pflanze im Bestand, LAV die senkrecht zur Strömung stehende Blattfläche pro Volumeneinheit und  $l_M$  die Mischungsweglänge an. In dem Widerstandsbeiwert  $c_d$  ist außerdem ein Faktor enthalten, der die Abschirmungseffekte der umstehenden Pflanzen berücksichtigt. Werte der Größe  $A_1$  sind für zahlreiche Vegetationsformen bei Cionco (1972 b; 1983) zusammengestellt und liegen im allgemeinen zwischen 2 und 4. Mit einem  $A_1$ , das der jeweiligen Vegetationsform entspricht, und Gl. (37) lassen sich die Windprofile im oberen Teil der meisten Bestände hinreichend gut beschreiben (Raupach und Thom, 1981).

Mit Messungen in einem Fichtenwald versuchten Landsberg und James (1971) folgende Gleichung für das Windprofil innerhalb eines Bestandes zu verifizieren:

$$\overline{u_h}(z) = \overline{u_h}(H) \cdot (1 + A_2 \cdot (1 - \frac{z}{H}))^{-2} \quad 0 < z \leq H \quad (39)$$

In Gl. (39) ist  $A_2$  ein dimensionsloser Koeffizient, für den Thom (1971) aus Windkanaluntersuchungen einen Wert  $A_2=2.5$  ermittelte. Wie schon Gl. (37), gilt auch diese Gleichung nicht am Waldboden ( $z/H=0$ ), da beide Gleichungen die Randbedingung am Boden ( $u_h(0)=0$  m/s) nicht erfüllen. Die hier angegebene untere Grenze für den Geltungsbereich der Gl. (39) wurde von Thom (1971) übernommen.

Landsberg und Jarvis (1973) verbesserten die mit Gl. (39) berechneten Windprofile, indem sie folgenden empirischen Ansatz

für  $A_2$  wählten:

$$A_2 = 6.85 \cdot \sqrt{\frac{LAD(z)}{\overline{u_h}(H)}} \quad (40)$$

Diese Zahlenwertgleichung erfordert die Angabe der höhenabhängigen Oberfläche aller Blätter pro Volumeneinheit  $LAD(z)$  in  $m^2/m^3$  und der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit an der Bestandshöhe  $\overline{u_h}(H)$  in  $m/s$ . Mit den nach dieser Gleichung ermittelten  $A_2$ -Werten erhielten Landsberg und Jarvis (1973) eine gute Übereinstimmung zwischen den von ihnen gemessenen Windprofilen mit denen, die nach Gl. (39) berechnet wurden.

Im physikalischen Sinn können Gl. (37) und Gl. (39) nicht befriedigen, da sehr viele Annahmen zu ihrer Ableitung gemacht werden müssen. Obwohl die meisten Windprofile im Bestand durch geeignete Wahl der Koeffizienten  $A_1$  bzw.  $A_2$  mit Gl. (37) bzw. Gl. (39) verhältnismäßig gut beschrieben werden, sind hier mit Ausnahme des Windprofils von Cionco (1983) in Abb. 1 nur Profile wiedergegeben, die auf Meßwerten beruhen und deren Verlauf nicht über empirische Gleichungen verändert wurde. Als Beispiele sind in Abb. 1 bis Abb. 3 Windprofile wiedergegeben, die aus Messungen in unterschiedlichen Beständen gewonnen wurden. Um die Profile besser vergleichen zu können, wurde die Höhe  $z$  und die mittlere horizontale Windgeschwindigkeit in dieser Höhe  $\overline{u_h}(z)$  mit der Bestandshöhe  $H$  bzw. der entsprechenden mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit  $\overline{u_h}(H)$  normiert.

In Abb. 1 sind einige normierte Windprofile, die in Mais- (*Zea mays*) und Sojabohnenbeständen (*Glycine max*) gemessen wurden, zusammengestellt. Zum Vergleich ist außerdem ein Profil, das nach Gl. (37) mit einem Faktor  $A_1=1.97$  von Cionco (1983) berechnet wurde, enthalten. Diesen Faktor ermittelte er nach Werten von Tan und Ling (1961) für einen Maisbestand. Dabei zeigt sich bei allen Profilen eine schnelle Abnahme der horizontalen Windgeschwindigkeit mit abnehmender Höhe im oberen Teil des Bestandes. Im mittleren und unteren Teil wird dann die Geschwindigkeitsabnahme sehr gering, wobei aber keine Ge-

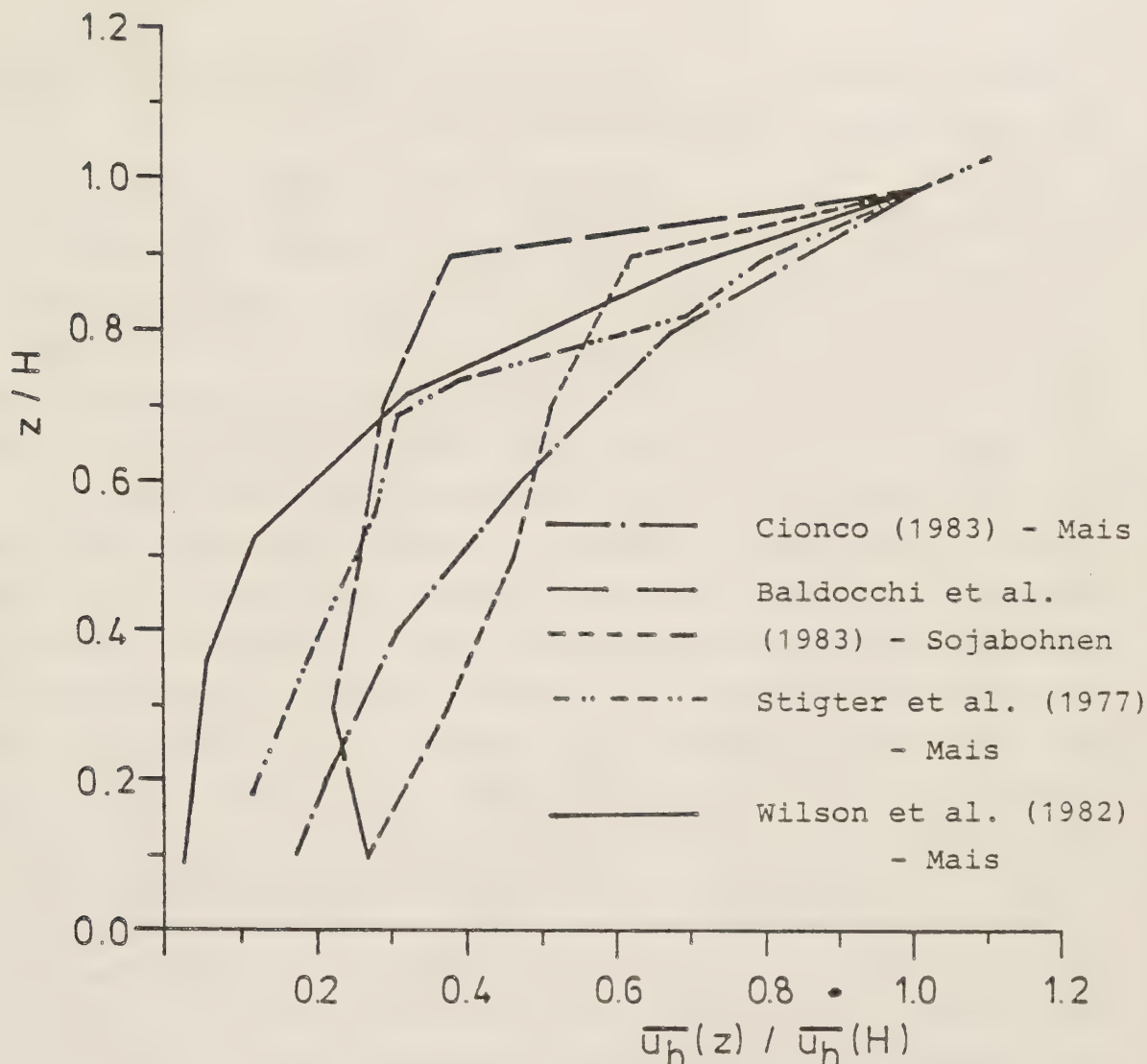


Abb. 1: Normierte Windprofile in Mais- und Sojabohnenbeständen nach verschiedenen Autoren

schwindigkeitszunahme mit abnehmender Höhe zu verzeichnen ist. Auf dieses Phänomen wird später noch näher eingegangen.

Das Profil von Wilson et al. (1982) wurde ebenfalls mit Gl. (37) berechnet, wobei sie als Mittelwert aus den eigenen Messungen in einem Maisfeld den Faktor  $A_1=4.0$  erhielten. Bezieht man die Profile von Baldocchi et al. (1983) und Stigter et al. (1977), die bei horizontalen Windgeschwindigkeiten  $\overline{u_h}(H)=2.4$  m/s bzw.  $\overline{u_h}(H)=1.5$  m/s ermittelt wurden, in den Vergleich mit ein, so zeigt sich deutlich, daß die horizontale Windgeschwin-

digkeit im oberen Teil des Bestandes umso schneller abnimmt, je größer sie an der Bestandshöhe ist.

Die beiden Profile von Baldocchi et al. (1983) belegen außerdem den Einfluß der Bestandsgeometrie auf die Form der Windprofile. In einem in Reihen angepflanzten Sojabohnenbestand bestimmten sie sowohl innerhalb der Reihen ein Windprofil, das als grob gestrichelte Linie in Abb. 1 wiedergegeben ist, als auch ein Profil zwischen den Reihen, das in Abb. 1 durch die fein gestrichelte Kurve dargestellt ist. Baldocchi et al. (1983) beobachteten im oberen Teil des Windprofils, das sie innerhalb der Reihen gemessen hatten, eine viel größere Windscherung als zwischen den Reihen. Dies führten sie darauf zurück, daß die Blätter in den Reihen dichter angeordnet und damit auch weniger flexibel als zwischen den Reihen sind, was zu einer größeren Reibung in den Reihen führt. Ein weiterer Unterschied wird durch die negative Windscherung, die nur in den Reihen auftrat, belegt. Auf diese räumliche Variabilität der Windprofile wies u.a. Bergen (1971) anhand von Profilen hin, die er in einem Kiefernbestand ermittelte. Insbesondere bei Nadelwäldern sind diese räumlichen Unterschiede und damit auch der Einfluß der verschiedenen Bestandsparameter von erheblicher Bedeutung.

Im Gegensatz zu Abb. 1, in der Windprofile aus relativ niedrigen, landwirtschaftlichen Vegetationsformen zusammengestellt sind, sind in Abb. 2 Profile dargestellt, die in und über Nadelwäldern ermittelt wurden. Das Windprofil von Mayer (1976) in Abb. 2 zeigt als einziges ein sekundäres Maximum im Stammraum des Bestandes. Als notwendige Voraussetzungen für das Auftreten eines solchen Maximums führte Shaw (1977) an, daß die Divergenz des turbulenten Schubspannungstransportes das entgegengesetzte Vorzeichen wie das Produkt aus Druck und Geschwindigkeitsgradienten besitzen, sowie dem Betrag nach größer sein muß.

In dem Windprofil von Fons (1940) zeigt sich ebenfalls eine

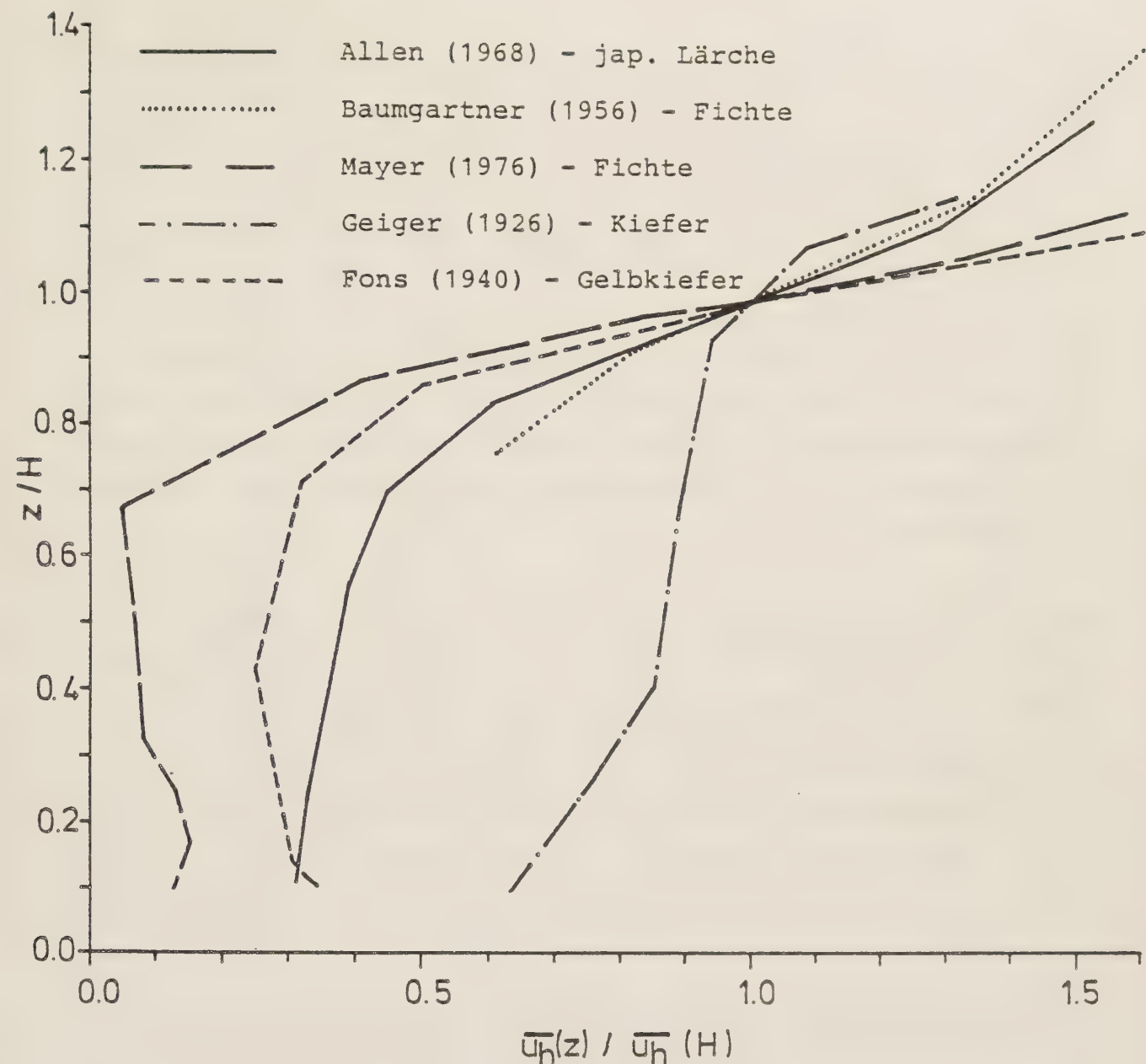


Abb. 2: Normierte Windprofile in und über Nadelwäldern nach verschiedenen Autoren

Zunahme der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h(z)$  mit Annäherung an den Waldboden. Da am Waldboden  $\overline{u_h}(z=0)=0$  ist, würde bei einer Ergänzung des Kurvenverlaufes bis zum Waldboden hin, auch dieses Profil ein sekundäres Maximum zeigen. Während bei Mayer (1976) das sekundäre Windgeschwindigkeitsmaximum bei einer relativen Höhe  $z/H=0.18$  auftritt, liegt ein mögliches sekundäres Maximum bei Fons (1940) im Bereich  $0.0 < z/H \leq 0.1$ . Be-

rücksichtigt man die in Tab. 2 zusammengestellten Charakteristika der Bestände von Fons (1940) und Mayer (1976), so zeigen sich zwei bedeutende Unterschiede. Einerseits ist der Stammraum des Bestandes von Fons (1940) mit einer mittleren Kronenansatzhöhe  $H_a = 3.1$  m deutlich niedriger als der Stammraum des Bestandes von Mayer (1976) mit  $H_a = 17.0$  m. Andererseits ist der Bestand von Fons (1940) mit 2100 Stämmen pro ha sehr viel dichter als der Bestand von Mayer (1976) mit 800 Stämmen pro ha. Somit scheinen, zumindest für die Ausbildung eines sekundären Windmaximums in einem Bestand, die Dichte und die mittlere Kronenansatzhöhe des Bestandes eine maßgebliche Bedeutung zu besitzen.

Den Einfluß der Baumart und der Stärke der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit an der Bestandshöhe  $\overline{u_h}(H)$  auf den Verlauf der vertikalen Windprofile im Bestand, ist in den Windprofilen ohne sekundäres Maximum von Geiger (1926) und Allen (1968) zu erkennen. Unter Einbeziehung der Werte für  $\overline{u_h}(H)$  aus Tab. 2 folgt aus Abb. 2, daß in Bodennähe die Windgeschwindigkeit in dem relativ lichten Kiefernbestand von Geiger (1926) trotz der geringeren horizontalen Windgeschwindig-

Tab. 2: Bestandscharakteristika und Windverhältnisse für die in Abb. 2 dargestellten vertikalen Windprofile; H: Bestandshöhe,  $H_a$ : mittlere Kronenansatzhöhe,  $\overline{u_h}(H)$ : mittlere horizontale Windgeschwindigkeit an der Bestandshöhe

| Autor                 | Baumart     | H<br>in m | $H_a$<br>in m | Alter<br>in a | Stämme<br>pro ha | $\overline{u_h}(H)$<br>in m/s |
|-----------------------|-------------|-----------|---------------|---------------|------------------|-------------------------------|
| Allen (1968)          | jap. Lärche | 10.4      | -. -          | --            | 1110             | 2.4                           |
| Baumgartner<br>(1956) | Fichte      | 5.6       | 0.0           | 20            | 3640             | 1.0                           |
| Fons (1940)           | Gelbkiefer  | 21.3      | 3.1           | 50            | 2100             | 1.8                           |
| Geiger (1926)         | Waldkiefer  | 15.0      | 9.8           | 65            | 960              | 1.6                           |
| Mayer (1976)          | Fichte      | 30.0      | 17.0          | 80            | 800              | 0.8                           |

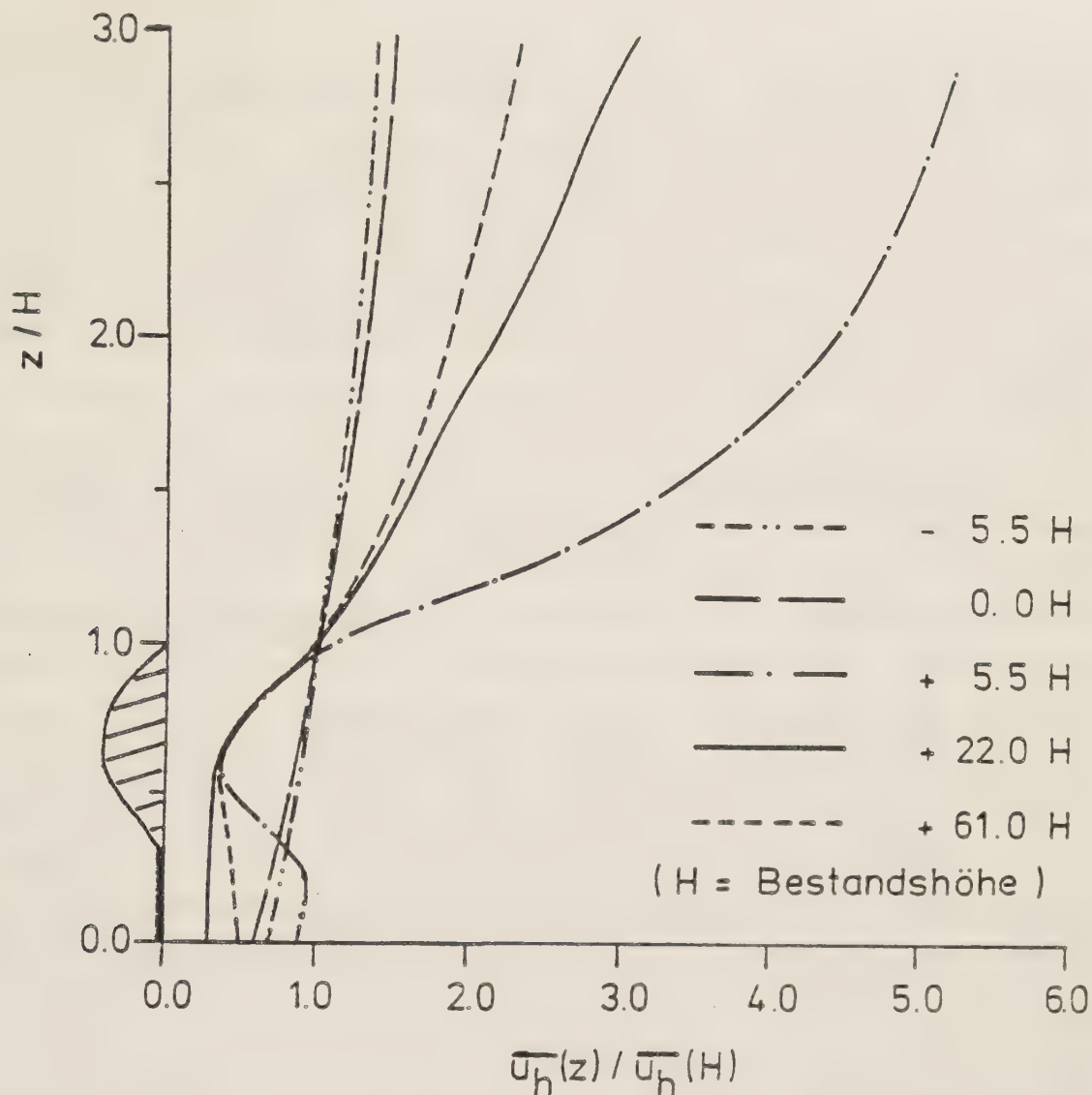


Abb. 3: Normierte Windprofile vor, in und hinter einem künstlichen Wald; Nullpunkt der Längenangaben am luvseitigen Waldrand (nach Meroney, 1968)

keit an der Bestandshöhe höher ist als in dem Bestand aus japanischen Lärchen (*Larix kaempferi*) von Allen (1968). Nach Mitscherlich (1970) besitzen japanische Lärchen einen geringfügig höheren Blattflächenindex, das ist die Oberfläche aller Blätter oder Nadeln der Bäume eines Bestandes bezogen auf eine Flächeneinheit der gesamten Bestandsfläche, als Kiefern. Da die Nadeln von japanischen Lärchen kleiner sind als die von Kiefern, bedeutet ein höherer Blattflächenindex, daß japanische Lärchen mehr Nadeln haben. Somit ist zu erwarten, daß die

Windgeschwindigkeit im Kronenraum eines Bestandes aus japanischen Lärchen stärker abgebremst wird als in einem Kiefernbestand, was auch aus den entsprechenden Kurven in Abb. 2 zu entnehmen ist. Leider haben sowohl Geiger (1926) als auch Fons (1940) für ihre Bestände den Blattflächenindex nicht angegeben, so daß die gemachten qualitativen Aussagen nicht näher spezifiziert werden können.

In Abb. 3 sind Ergebnisse von Meroney (1968) aus Windkanalversuchen enthalten. Sie belegen den Einfluß der Entfernung des Bestandsrandes auf das vertikale Windprofil, weshalb in Abb. 3 alle Längenangaben in Vielfachen der Bestandshöhe  $H$  angegeben und auf den luvseitigen Bestandsrand bezogen sind. Es zeigen sich bei den Profilen, die vor dem Bestand ( $= - 5.5 H$ ) und am vorderen Bestandsrand ( $= 0.0 H$ ) aufgenommen wurden, nur geringe Unterschiede. Geht man jedoch weiter in den Bestand hinein, so weisen die Profile eine starke Abnahme der Windgeschwindigkeit im Kronenraum bis zu einer relativen Höhe  $z/H=0.6$  auf. Unterhalb dieser Höhe nimmt bei dem Profil, das in  $5.5 H$  im Bestand gemessen wurde, die Windgeschwindigkeit wieder stark zu, bis sie im Stammraum nahezu ihren Betrag von der Bestandshöhe erreicht. So hohe relative Windgeschwindigkeiten treten in der Natur im Stammraum eines Bestandes selten auf. Geringere relative Windgeschwindigkeiten beobachtete u.a. Reifsnyder (1955) bei seinen Untersuchungen in einem kleinen, isolierten Bestand und bezeichnete diesen Effekt als 'blow-through'. Mit zunehmender Entfernung vom luvseitigen Bestandsrand verringern sich die horizontalen Windgeschwindigkeiten im Stammraum wieder, was aus den Profilen im Bestand ( $= 22.0 H$ ) und am hinteren Bestandsrand ( $= 61.0 H$ ) ersichtlich ist. Insbesondere zeigen diese beiden Profile kein sekundäres Windmaximum unterhalb der mittleren Kronenansatzhöhe des Bestandes.

Anhand der Windprofile in Abb. 3 wird auch eine der Schwierigkeiten, die bei Windkanaluntersuchungen auftreten können, veranschaulicht. So zeigen alle Windprofile von Meroney (1968) am Boden ( $z/H=0.0$ ) eine horizontale Windgeschwindigkeit, die grö-

ßer als Null ist. Es liegt nahe, dies mit der im Vergleich zum natürlichen Waldboden sehr viel glatteren Oberfläche des Windkanals zu erklären. Weiterhin scheinen in der laminaren Grenzschicht im Windkanal sehr starke Geschwindigkeitsgradienten aufgetreten zu sein, so daß schon knapp über dem Boden erhebliche Windgeschwindigkeiten auftreten konnten. Diese, im Vergleich zu den in der Natur in der gleichen relativen Höhe über dem Waldboden vorkommenden, hohen horizontalen Windgeschwindigkeiten führten u.a. dazu, daß sich im Stammraum des Modellbestandes von Meroney (1968) keine deutlichen sekundären Maxima in den Windprofilen ausprägen konnten.

### 3.2 Turbulenzkenngrößen

Beschreibt man das bodennahe Windfeld nur durch mittlere Windgeschwindigkeiten, so geht die Information über die Unregelmäßigkeiten in diesem Windfeld verloren. Diese Störungen treten in räumlicher und zeitlicher Hinsicht zufällig auf und werden unter dem Begriff 'Windturbulenz', im folgenden kurz Turbulenz genannt, zusammengefaßt. Da es schwierig ist, die Turbulenz geeignet zu definieren, beschränkt man sich im allgemeinen auf die Charakterisierung ihrer Merkmale. Wegen des Zufallscharakters der Turbulenz werden dazu häufig statistische Kenngrößen herangezogen. Einige der häufiger verwendeten Maßzahlen werden in diesem Abschnitt dazu benutzt, die Windturbulenz in und über Pflanzenbeständen zu beschreiben.

Neben dem Zufallscharakter besitzt die Turbulenz auch die Eigenschaft, dreidimensional zu sein. Dies wird bei der Berechnung der Turbulenzintensitäten berücksichtigt, die komponentenweise durch folgende Gleichung definiert sind (Cionco, 1972 a; Mayer, 1981):

$$i_j = \frac{\sigma_j}{|\vec{u}|} \quad , \quad j = u_1, u_2, u_3 \quad (41)$$

Dabei bedeuten  $i_{u_1}$  die longitudinale,  $i_{u_2}$  die laterale und  $i_{u_3}$

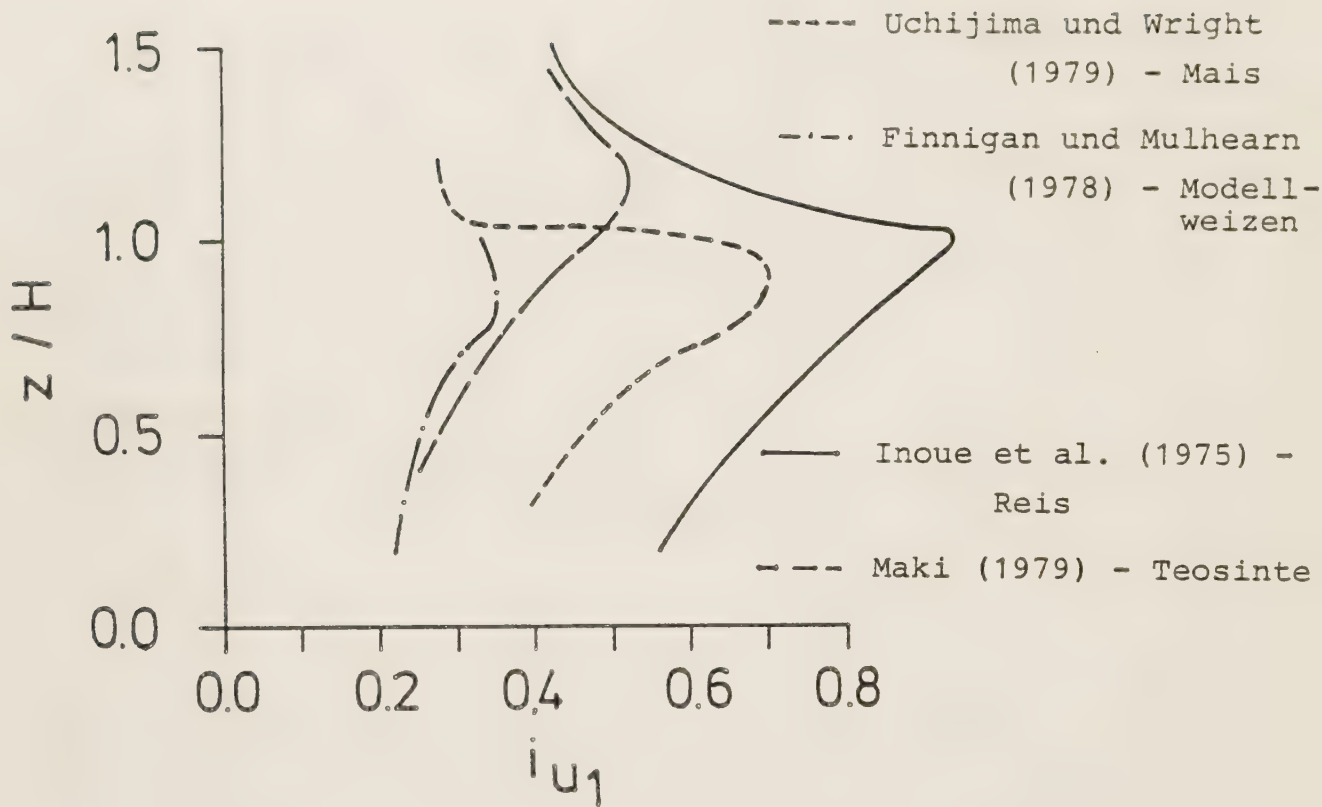


Abb. 4: Vertikalprofile der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$  in und über einigen landwirtschaftlichen Beständen nach verschiedenen Autoren

die vertikale Turbulenzintensität,  $\sigma_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  die Standardabweichung der jeweiligen Windvektorkomponente und  $|\vec{u}|$  den Betrag des mittleren Windvektors.

In Abb. 4 sind die Vertikalprofile der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$ , die in und über einigen landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen bestimmt wurden, dargestellt, während in Abb. 5 diese Profile für verschiedene Waldbestände wiedergegeben sind. Es zeigt sich, daß in natürlichen Waldbeständen die longitudinale Turbulenzintensität ihre maximalen Werte im allgemeinen unterhalb der Bestandshöhe annimmt. Bei dem Waldmodell wie auch bei den natürlichen landwirtschaftlichen Beständen treten die Maxima von  $i_{u_1}$  zumeist in der Nähe der Bestandshöhe auf. Der modellierte Weizenbestand (Abb. 4) weist

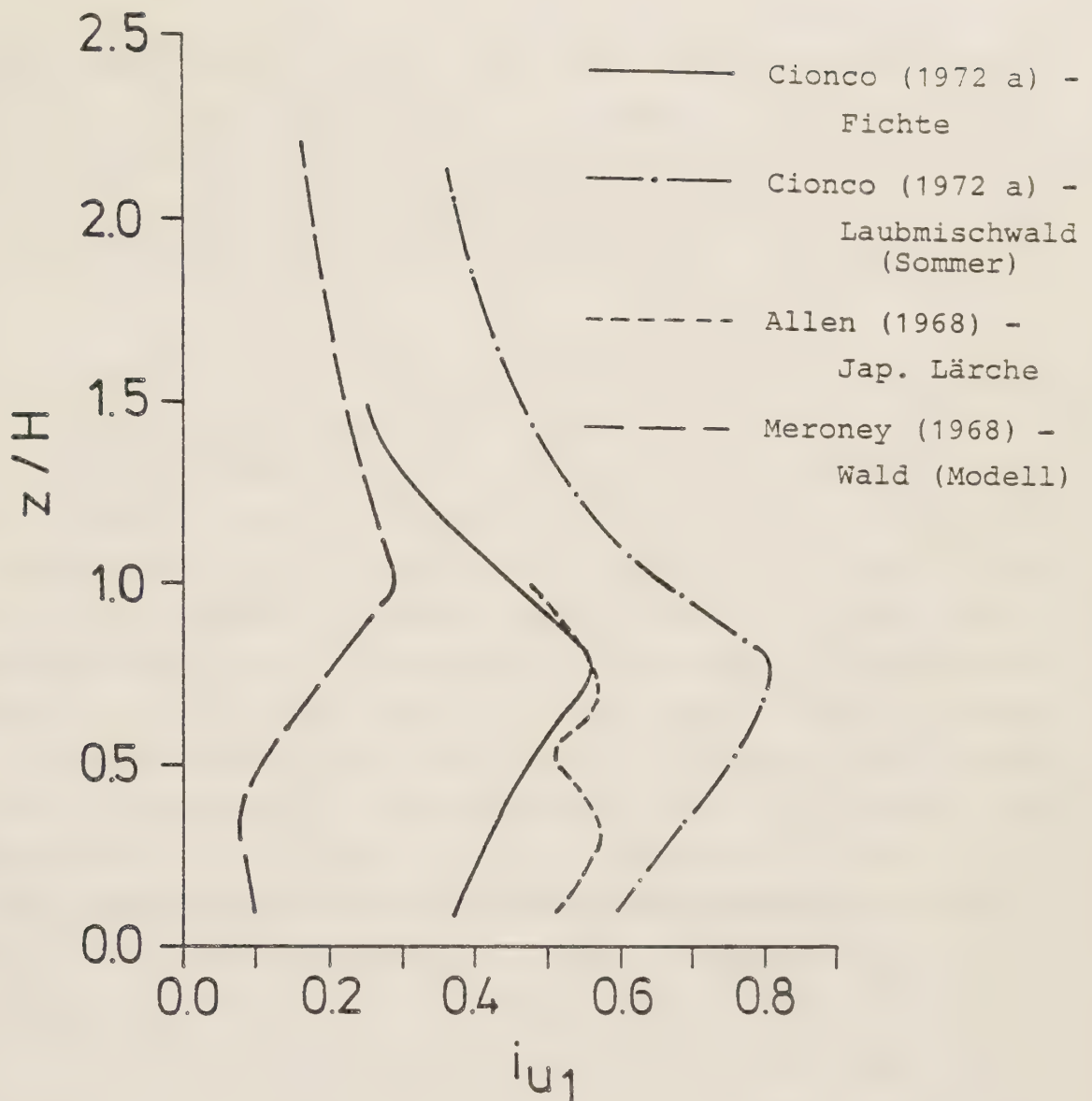


Abb. 5: Vertikalprofile der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$  in und über Wäldern nach verschiedenen Autoren

hingegen wieder maximale Werte von  $i_{u_1}$  in einer relativen Höhe auf, in der diese Werte sonst nur bei den natürlichen Waldbeständen vorkommen. Einerseits belegt dies, daß durch die Modellierung von landwirtschaftlichen Beständen und Wäldern in Windkanälen die Eigenschaften der natürlichen Bestände nur in gewissen Grenzen reproduziert werden. Andererseits zeigt sich, daß die Maxima von  $i_{u_1}$  in der Natur in landwirtschaftlichen Beständen in größeren relativen Höhen vorkommen als in Wäldern.

Cionco (1972 a) faßte zahlreiche Untersuchungen über Turbulenzintensitäten zusammen und stellte fest, daß  $i_{u_1}$  grundsätzlich mit zunehmender Bewuchsdichte zunimmt. Er gab als typische Werte für landwirtschaftliche Nutzflächen  $i_{u_1} \approx 0.4$ , für lichte Wälder  $i_{u_1} \approx 0.6$  und für tropische Urwälder  $0.7 \leq i_{u_1} \leq 1.2$  an.

Bei Beständen mit einer gleichmäßigen Vertikalverteilung der Blattflächen, wie z.B. Weizen, Reis oder verschiedenen Windkanalmodellen, war  $i_{u_1}$  unabhängig von der Höhe (Cionco, 1972 a; Inoue et al., 1975). Dies wird näherungsweise in Abb. 4 und Abb. 5 durch die Vertikalprofile von Finnigan und Mulhearn (1978) sowie von Meroney (1968) belegt. Im Vergleich zu den longitudinalen Turbulenzintensitäten, die in natürlichen Beständen erfaßt wurden, sind die Schwankungen von  $i_{u_1}$  innerhalb dieser Modellbestände sehr gering. Dies gilt besonders für den von Finnigan und Mulhearn modellierten Weizenbestand, wobei sie die geringe Zunahme von  $i_{u_1}$  mit der Höhe auf die Schwingungen der Pflanzen zurückführten. Sind die Bestände, wie z.B. Wälder, stärker strukturiert, so neigen die  $i_{u_1}$ -Profile dazu, der Vertikalverteilung der Blattflächen zu folgen (Raupach und Thom, 1981). Das wird auch durch das in Abb. 5 dargestellte  $i_{u_1}$ -Profil bestätigt, das Meroney (1968) in einem künstlichen Wald im Windkanal ermittelte. Beginnend bei einer relativen Höhe  $z/H=0.3$  nimmt  $i_{u_1}$  bis zur Bestandshöhe zu, was genau dem Kronenraum des künstlichen Waldes entspricht.

Die Einflüsse der mittleren Windgeschwindigkeit an der Bestandshöhe und der Schichtung auf das Vertikalprofil der longitudinalen Turbulenzintensität wurden nur von Inoue et al. (1975) angesprochen. Sie fanden nur eine schwache Abhängigkeit der  $i_{u_1}$ -Profile von diesen beiden Faktoren, wobei insbesondere innerhalb der Bestände der Einfluß der Blattflächenverteilung dominierte. Die übrigen Autoren aus Abb. 4 und Abb. 5 berücksichtigten diese zwei Faktoren bei der Diskussion ihrer Vertikalprofile nicht. Somit genügt die von Raupach und Thom (1981) angesprochene Abhängigkeit der  $i_{u_1}$ -Profile von der vertikalen

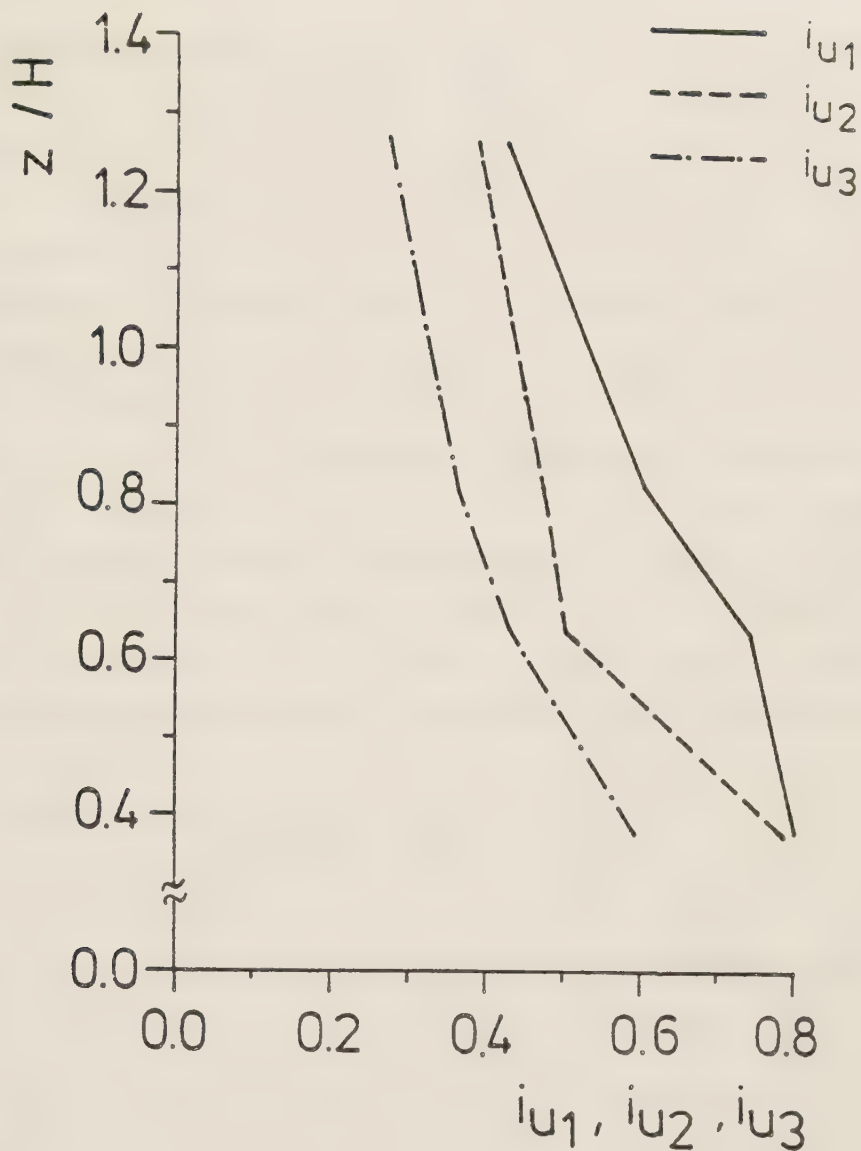


Abb. 6: Vertikalprofile der longitudinalen ( $= i_{u_1}$ ), lateralen ( $= i_{u_2}$ ) und vertikalen ( $= i_{u_3}$ ) Turbulenzintensitäten in und über einem Maisbestand (nach Shaw et al., 1974 b)

Blattflächenverteilung, um den Verlauf der in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellten Profile hinreichend gut zu erklären.

Die laterale bzw. vertikale Turbulenzintensität  $i_{u_2}$  bzw.  $i_{u_3}$  sind näherungsweise proportional zur longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$ , was durch die Ergebnisse von Shaw et al. (1974 b) für einen Maisbestand (*Zea mays*) und von Mayer (1981) für einen Fichtenwald (*Picea abies*) bestätigt wird. In einer

relativen Höhe  $z/H=1.27$  über dem Maisbestand betrug im Mittel  $i_{u_2}/i_{u_1}=0.91$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}=0.64$  (Shaw et al., 1974 b), während sich in einer Höhe von  $z/H=1.03$  über einem Fichtenwald ergab:  $i_{u_2}/i_{u_1}=0.78$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}=0.57$  (Mayer, 1985). Die geringeren Werte von Mayer (1985) stimmen sehr gut mit den von Counihan (1975) für eine adiabatisch geschichtete Grenzschicht angegebenen Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}=0.75$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}=0.50$  überein. Außerdem folgt aus diesen Zahlen für die Turbulenzintensitäten an der Bestandshöhe eines Fichtenwaldes:  $i_{u_1} > i_{u_2} > i_{u_3}$ . Dieser Zusammenhang wurde auch von Shaw et al. (1974 b) bei Untersuchungen in und über einem Maisbestand ermittelt. Ein Teil ihrer Ergebnisse ist in Abb. 6 wiedergegeben, aus der prinzipiell eine Abnahme der Beträge aller drei Komponenten der Turbulenzintensität mit zunehmender Höhe zu entnehmen ist.

Ein Vergleich des Vertikalprofils der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$  von Uchijma und Wright (1964) in Abb. 4 mit dem entsprechenden Profil von Shaw et al. (1974 b) in Abb. 6 zeigt zwei gegensätzliche Höhenabhängigkeiten von  $i_{u_1}$ . Während in Abb. 4 die  $i_{u_1}$ -Werte vom Boden zur Bestandshöhe hin zunehmen, ist aus Abb. 6 eine Abnahme dieser Werte zu entnehmen, obwohl beide Profile in gleichartigen Maisbeständen ermittelt wurden. Aufgrund der Angaben der Autoren kann dieser Unterschied nur durch die verschiedenen Reifestadien der beiden Bestände während der Messungen erklärt werden. Uchijma und Wright (1964) führten ihre Messungen in einem jugendlichen, unreifen Bestand durch, während Shaw et al. (1974 b) einen alten, vollreifen Bestand untersuchten. Somit liegt es auch hier nahe, die verschiedenen  $i_{u_1}$ -Profile durch die, vom differierenden Pflanzenalter bedingten Unterschiede der vertikalen Blattflächenverteilungen in den beiden Beständen zu erklären.

In Ergänzung zu den Turbulenzintensitäten können die Eigenschaften der Turbulenz auch durch andere, im folgenden zusammengestellt Kenngrößen beschrieben werden. Sie wurden u.a. von Mayer und Amtmann (1983) verwendet, um die Turbulenz an der Bestandshöhe eines Fichtenwaldes zu charakterisieren. Dazu be-

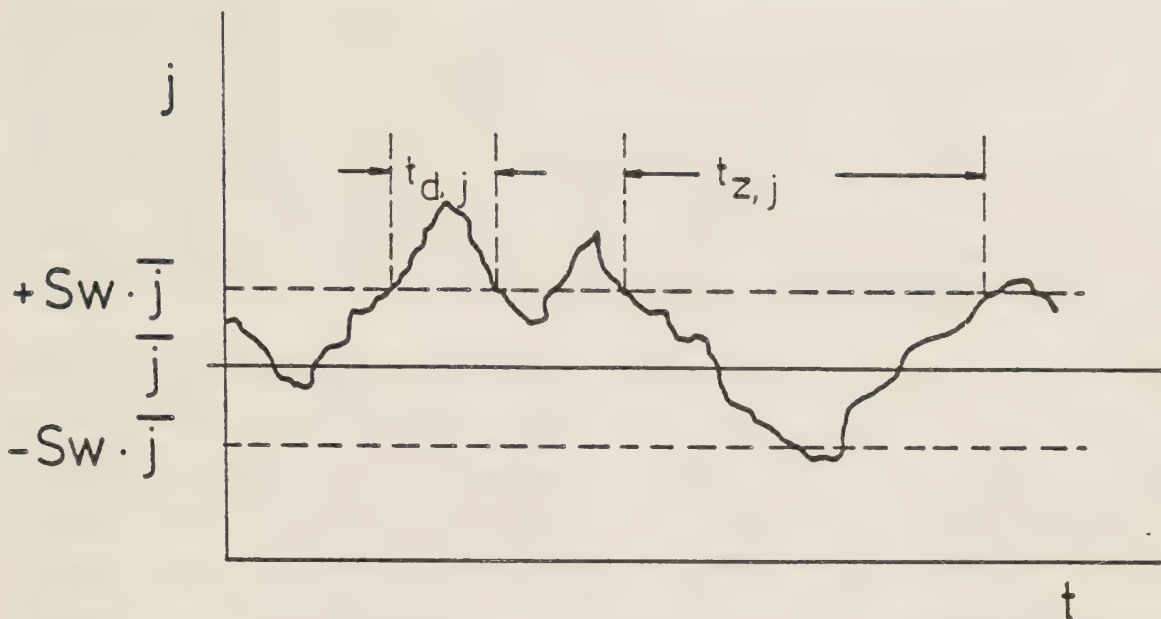


Abb. 7: Schematische Darstellung zur Bestimmung der Böigkeits-  
 kenngößen  $t_{d,j}$  und  $t_{z,j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ; Sw: Schwellen-  
 wert (nach Platow, 1970)

rechneten sie die mittleren, komponentenweise aufgegliederten  
 Böigkeitsfaktoren nach Gl. (42) (siehe u.a. Grimm, 1968; Wie-  
 ringa, 1973):

$$GT_j = \frac{j^{\max}}{|\vec{u}|}, \quad j = u_1, u_2, u_3 \quad (42)$$

Darin sind mit  $GT_{u_1}$  der longitudinale, mit  $GT_{u_2}$  der laterale,  
 mit  $GT_{u_3}$  der vertikale Böigkeitsfaktor und mit  $|\vec{u}|$  der Betrag  
 des mittleren Windvektors, gemittelt über die Meßlaufdauer T,  
 bezeichnet.  $j^{\max}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  gibt das Maximum der jeweiligen  
 Windvektorkomponente im Zeitintervall  $t'$  an. Da man im allge-  
 meinen nur Böigkeitsfaktoren benutzt, die über die Beobach-  
 tungsdauer T gemittelt wurden, muß das Zeitintervall  $t'$ , in  
 dem das Maximum der jeweiligen Windvektorkomponente bestimmt  
 wird, klein gegenüber T gewählt werden.

Weitere Maßzahlen für die Turbulenz ergeben sich aus der Defi-  
 nition von Böen als Fluktuationen der Windvektorkomponenten

Tab. 3: Mittlere Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ , mittlere Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$  (in s) sowie mittlere Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$  (in s),  $j=u_1, u_2, u_3$  knapp über der Bestandshöhe ( $z/H=1.03$ ) eines Fichtenwaldes bei verschiedenen Meßläufen (nach Amtmann, 1981; Mayer und Amtmann, 1983)

|              | $\overline{GT_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_2}}$ | $\overline{GT_{u_3}}$ | $\overline{t_{d,u_1}}$<br>in s | $\overline{t_{d,u_2}}$<br>in s | $\overline{t_{d,u_3}}$<br>in s | $\overline{t_{z,u_1}}$<br>in s | $\overline{t_{z,u_2}}$<br>in s | $\overline{t_{z,u_3}}$<br>in s |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| M1, 10.12.79 | 2.2                   | 0.8                   | 0.7                   | 3.9                            | 2.0                            | 1.4                            | 1.2                            | 1.6                            | 1.6                            |
| M2, 10.12.79 | 2.2                   | 1.0                   | 0.7                   | 2.8                            | 1.6                            | 1.1                            | 0.9                            | 0.9                            | 0.9                            |
| M3, 10.12.79 | 2.2                   | 1.0                   | 0.7                   | 2.9                            | 1.3                            | 0.9                            | 0.8                            | 0.9                            | 1.0                            |
| M1, 11.12.79 | 2.4                   | 1.0                   | 0.7                   | 2.2                            | 1.1                            | 0.8                            | 0.7                            | 0.8                            | 0.8                            |
| M2, 11.12.79 | 2.2                   | 0.9                   | 0.7                   | 2.8                            | 1.3                            | 0.8                            | 0.9                            | 1.0                            | 1.0                            |
| M3, 11.12.79 | 2.6                   | 1.0                   | 0.7                   | 3.9                            | 1.7                            | 1.1                            | 0.9                            | 1.2                            | 1.1                            |
| M4, 11.12.79 | 2.4                   | 1.0                   | 0.7                   | 2.6                            | 1.3                            | 0.9                            | 0.7                            | 0.9                            | 0.9                            |

$j', j=u_1, u_2, u_3$ , die dem Betrag nach um einen vorgegebenen Schwellenwert  $Sw$  von der entsprechenden mittleren Windvektorkomponente  $\bar{j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  abweichen (Platow, 1970). Diese Definition ist in Gl. (43) als mathematische Ungleichung formuliert, wobei  $Sw$  einen frei zu wählenden Schwellenwert bedeutet:

$$|j'| > Sw \cdot \bar{j} \quad , \quad j = u_1, u_2, u_3 \quad (43)$$

Über Gl. (43) lassen sich dann die Dauer von Böen und die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen bestimmen. In Abb. 7 sind diese beiden Kenngrößen schematisch dargestellt. Auch diese Maßzahlen werden in Abhängigkeit von dem Schwellenwert  $Sw$  über den Beobachtungszeitraum  $T$  gemittelt, so daß man dann die mittleren Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und die mittleren Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  erhält.

In Tab. 3 sind aus Amtmann (1981) sowie Mayer und Amtmann

(1983) für die Bestandshöhe eines Fichtenwaldes einige Turbulenzkenngrößen zusammengestellt. Für die Berechnungen der mittleren Böigkeitsfaktoren wurde  $t'=60$  s gewählt, wobei  $T$  immer größer oder gleich 20 min war. Die mittleren Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen und die mittleren Böendauern wurden für einen Schwellenwert  $Sw=0.2$  berechnet.

An der Bestandshöhe eines Fichtenwaldes verhalten sich nach Tab. 3 die mittleren Böigkeitsfaktoren wie die Turbulenzintensitäten, d.h. es gilt immer:  $\overline{GT_{u_1}} > \overline{GT_{u_2}} > \overline{GT_{u_3}}$ . Mit anderen Worten weichen also die Maxima der longitudinalen Windvektorkomponente stärker vom Betrag des mittleren Windvektors ab als die Maxima der lateralen und vertikalen Windvektorkomponente. Dadurch wird z.B. ein Baum in der longitudinalen Richtung des Windvektors stärker dynamisch beansprucht als in der lateralen.

Verstärkend wirkt die im Mittel wiederum längere Dauer der Böen bei der longitudinalen Komponente, wobei auch hier für die Größenordnung gilt:  $\overline{t_{d,u_1}} > \overline{t_{d,u_2}} > \overline{t_{d,u_3}}$ . Während die Differenzen beim Vergleich von  $\overline{t_{d,u_1}}$  mit  $\overline{t_{d,u_2}}$  bis zu 2.2 s betragen können, unterscheiden sich die Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen in den drei Koordinatenrichtungen nicht in dem Maß. Für diese Kenngrößen gilt:  $\overline{t_{z,u_1}} < \overline{t_{z,u_2}} \approx \overline{t_{z,u_3}}$ . Eine Abhängigkeit dieser Maßzahlen von der mittleren Windgeschwindigkeit, wie sie u.a. von Grimm (1968) aus Messungen zwischen 53 m und 191 m über Grünland gefunden wurde, konnte nicht festgestellt werden (Mayer und Amtmann, 1983). Ein Vergleich dieser Kennwerte mit denen anderer Autoren (Platow, 1970; Wieringa, 1973) bestätigt den Einfluß der Rauigkeit, der jedoch an dieser Stelle nicht näher quantifiziert werden kann, da bei den mittleren Böigkeitsfaktoren z.B. der Einfluß der unterschiedlichen Beobachtungszeiträume  $T$  nicht eliminiert werden konnte.

### 3.3 Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponenten

Mit den im Abschnitt 3.2 zusammengestellten Kenngrößen lassen sich nur die räumlichen Unterschiede der Schwankungsanteile des bodennahen Windfeldes beschreiben, nicht aber die zeitlichen Variationen, also die zeitliche Aufeinanderfolge der Fluktuationen. In der Statistik benutzt man dazu im allgemeinen im Zeitbereich Korrelationsfunktionen oder im Frequenzbereich die spektralen Dichteverteilungen der Varianz, kurz Spektren genannt. Insbesondere für die Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponenten haben sich die Begriffe 'Energiespektrum' bzw. spektrale 'Energiedichte' eingebürgert. Da bei der Windgeschwindigkeit die Varianz die Einheit  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , also die Einheit einer kinetischen Energie pro Masseneinheit besitzt, werden diese Bezeichnungen dem Begriff 'Leistungsspektrum' vorgezogen, obwohl er z.B. im Bauwesen weit verbreitet ist. Dieser Begriff führt nämlich häufig zu Verwechslungen, da er im allgemeinen nichts mit dem Spektrum einer Leistung zu tun hat, sondern die wörtliche Übersetzung von 'power spectrum' darstellt (Thomson, 1962).

Die Zahl der Untersuchungen über spektrale Eigenschaften der Windturbulenz in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht ist besonders in den vergangenen 20 Jahren stark angestiegen. Aufgrund dieser Untersuchungen und theoretischer Überlegungen ist der prinzipielle Verlauf der Spektren über einen großen Frequenzbereich hinweg bekannt. Im Trägheitsbereich (engl. 'inertial subrange'), der ausführlich z.B. bei Monin und Yaglom (1975) behandelt wird, besteht zwischen dem Spektrum der Fluktuationen der longitudinalen Windvektorkomponente  $P_{u_1}(f)$ , im weiteren kurz longitudinales Windspektrum genannt, und der mittleren Dissipationsenergie  $\bar{\epsilon}$  sowie der Frequenz  $f$  folgender Zusammenhang (Obukhov, 1941; Monin und Yaglom, 1971):

$$f \cdot P_{u_1}(f) = A_{u_1} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\bar{\epsilon} \cdot u_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (44)$$

$A_{u_1}$  ist eine universelle Konstante, die in verschiedenen Experimenten zu 0.5 bestimmt wurde (Kaimal et al., 1972). Berücksichtigt man bei der Berechnung von  $\bar{e}$  nur die Umwandlung der kinetischen Energie der mittleren Strömung in turbulente Energie, so gilt bei einer logarithmischen Windverteilung mit der Höhe (Lumley und Panofsky, 1964; Freytag, 1976):

$$\bar{e} = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot z} \quad (45)$$

Mit Gl. (45) ergibt sich dann aus Gl. (44):

$$\frac{f \cdot P_{u_1}(f)}{u_*^2} = A_{u_1} \cdot (2 \cdot \pi \cdot \kappa)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{f \cdot z}{\bar{u}_1} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (46)$$

Aus dieser Gleichung ist zu entnehmen, daß das longitudinale Windspektrum von der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und damit von der Bodenrauigkeit, von der Höhe  $z$  und von der mittleren longitudinalen Windvektorkomponente  $\bar{u}_1$  abhängt.

Neben dem Abfall des Spektrums zu hohen Frequenzen hin, verlagert sich auch das Maximum mit zunehmendem  $\bar{u}_1$  zu höheren Frequenzen hin, wobei es aber im allgemeinen im Bereich der Wellenzahlen  $k_1$  ( $k_1 = 2\pi f / \bar{u}_1$ ) zwischen  $0.0017 \text{ 1/m} \leq k_1 \leq 0.0033 \text{ 1/m}$  liegt (Pasquill, 1962).

Der niederfrequente Teil des Spektrums zeigt eine starke Abhängigkeit von äußeren Parametern wie atmosphärischer Schichtung oder Bodenrauigkeit (Lumley und Panofsky, 1964). Bei neutralen und stabilen Verhältnissen ist für große Wellenzahlen  $f \cdot P_{u_1}(f)$  proportional zur Frequenz  $f$  (Kaimal et al., 1972; Kaimal, 1973).

Im Trägheitsbereich, also dem Bereich, der durch die in Gl. (44) ausgedrückte '-5/3-Proportionalität' der Spektralwerte zu  $f$  charakterisiert werden kann, gilt unter der Voraussetzung lokaler Isotropie, Inkompressibilität des turbulenten Strömungsfeldes und der Gültigkeit der Taylor Hypothese (Busch

und Panofsky, 1968):

$$\frac{P_{u_2}(f)}{P_{u_1}(f)} = \frac{P_{u_3}(f)}{P_{u_1}(f)} = \frac{4}{3} \quad (47)$$

Dabei wird mit  $P_{u_2}(f)$  das laterale und mit  $P_{u_3}(f)$  das vertikale Windspektrum bezeichnet. Dieser Zusammenhang wurde durch mehrere Untersuchungen bestätigt (u.a. Busch und Panofsky, 1968; Kaimal et al., 1972; Busch, 1973). Gl. (47) führte auch dazu, daß hauptsächlich für die longitudinalen Windspektren empirische Formeln entwickelt wurden (z.B. Davenport, 1961; Hino, 1971; Simiu, 1972). Als Beispiel werden hier die auf Gl. (46) aufbauenden, empirischen Gleichungen von Kaimal et al. (1972) für das longitudinale, laterale und vertikale Windspektrum bei nahezu adiabatischer Schichtung angegeben:

$$\frac{f \cdot P_{u_1}(f)}{u_*^2} = 105 \cdot \frac{f \cdot z}{|\vec{u}|} \cdot \left(1 + 33 \cdot \frac{f \cdot z}{|\vec{u}|}\right)^{-\frac{5}{3}} \quad (48)$$

$$\frac{f \cdot P_{u_2}(f)}{u_*^2} = 17 \cdot \frac{f \cdot z}{|\vec{u}|} \cdot \left(1 + 9.5 \cdot \frac{f \cdot z}{|\vec{u}|}\right)^{-\frac{5}{3}} \quad (49)$$

$$\frac{f \cdot P_{u_3}(f)}{u_*^2} = 2 \cdot \frac{f \cdot z}{|\vec{u}|} \cdot \left(1 + 5.3 \cdot \left(\frac{f \cdot z}{|\vec{u}|}\right)^{\frac{5}{3}}\right)^{-\frac{5}{3}} \quad (50)$$

Zur Veranschaulichung sind in Abb. 8 die nach Gl. (48) mit Gl. (50) ermittelten Amplituden der Spektren linear gegen die logarithmisch eingeteilte Frequenzachse aufgetragen. Die Berechnungen wurden mit  $z=10.0$  m und  $|\vec{u}|=5.0$  m/s durchgeführt.

In der Umgebung von Pflanzenbeständen ändern sich diese Verhältnisse in zweierlei Hinsicht. So ist es möglich, die Spektren über einem Pflanzenbestand, der eine bestimmte Höhe  $H$  hat, mit der effektiven Höhe  $z-d_0$ , anstelle der Höhe  $z$  über dem Erdboden, zu parameterisieren (Shaw et al., 1974 a). Diese Modifikation tritt auch schon bei der Berechnung des vertikalen Windprofils über höheren Vegetationsformen auf. Innerhalb

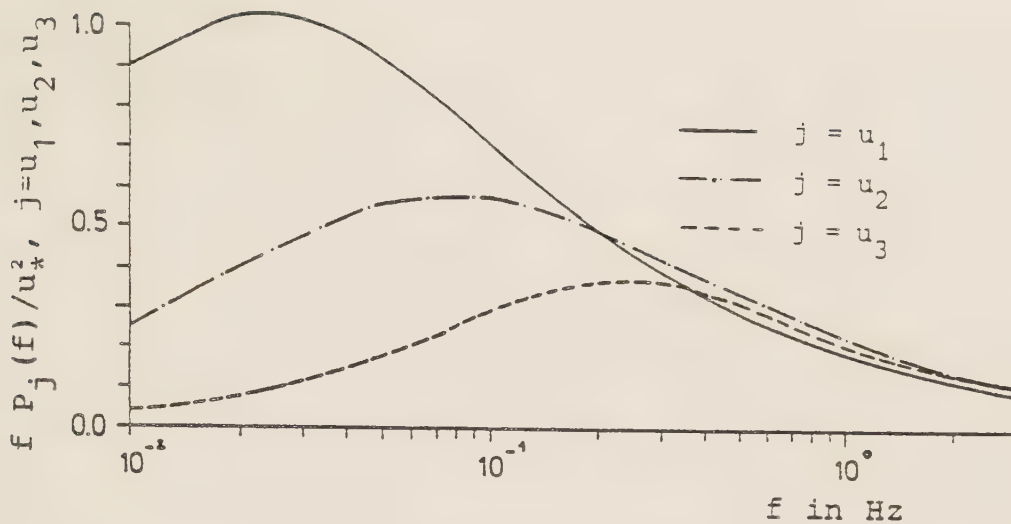


Abb. 8: Mit dem Quadrat der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  normiertes longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) (nach Kaimal et al., 1972)

eines Bestandes dagegen zeigen die Spektren keinen einheitlichen Verlauf, so daß dort eine sinnvolle Parameterisierung nicht möglich ist. Nach Untersuchungen von Allen (1968) und Seginer et al. (1976) scheint jedoch die Frequenz der Spektrenmaxima unabhängig von der Höhe zu sein.

Andererseits wird die Turbulenz in einem Pflanzenbestand sowohl durch Windscherung als auch durch Wirbelablösung im Lee einzelner Pflanzen erzeugt. Im Fall schwingender Pflanzen kommt zu diesen beiden Erzeugungsmechanismen ein dritter hinzu, der auf der Energieübertragung von den schwingenden Pflanzen zurück in die Strömung beruht (Finnigan, 1979 a). Die beiden letzten Phänomene können den hochfrequenten Teil der Spektren so beeinflussen, daß im Trägheitsbereich kein Abfall nach dem '-5/3-Gesetz' zu beobachten ist.

Baines (1972) und Isobe (1972) führten die Peaks in ihren Spektren, die sie aus Messungen über Weizen- bzw. Maisfeldern ermittelt hatten, auf die Wirbelablösung an den Halmen zurück. Shaw et al. (1974 a) fanden weder in dem von ihnen untersuch-

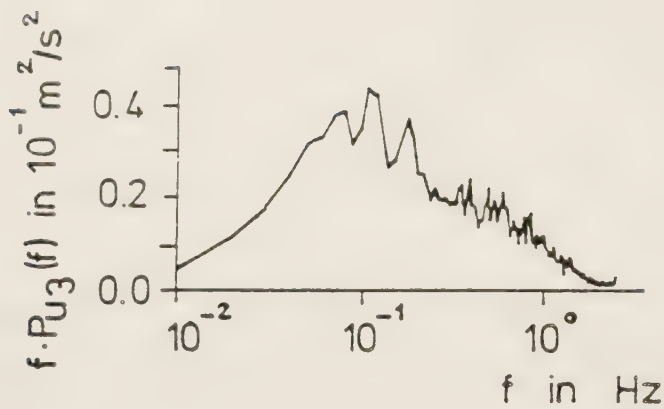


Abb. 9: Vertikales Windspektrum  $f \cdot P_{u_3}(f)$  knapp über der Bestandshöhe eines Fichtenhochwaldes (nach Amtmann, 1982)

ten Maisbestand (*Zea mays*) noch in ihrem Rotkiefernwald (*Pinus resinosa*) solche Peaks. Insbesondere im Verlauf der vertikalen Windspektren über dem Wald erhielten sie größere Unregelmäßigkeiten, als es von den universellen Spektren her zu erwarten gewesen wäre. Die vertikalen Windspektren beinhalteten deutlich mehr Energie in ihren Peaks, fielen betragsmäßig aber sehr stark bei niedrigen Frequenzen ab. Die in den Peaks enthaltene zusätzliche turbulente Energie führten Shaw et al. (1974 a) auf die Anwesenheit von einzelnen Pflanzenelementen in der Vegetation zurück.

Die Unregelmäßigkeiten im vertikalen Windspektrum fand auch Amtmann (1982) aufgrund seiner Messungen in einem Fichtenhochwald (*Picea abies*), was durch das Spektrum aus der Bestandshöhe dieses Waldes in Abb. 9 bestätigt wird.

Seginer et al. (1976) beschrieben hochfrequente Peaks, als deren Ursache sie die Wirbelablösung an den Zylindern, aus denen ihr Windkanalmodell bestand, verantwortlich machten. Gleichzeitig wiesen sie jedoch darauf hin, daß dadurch weniger als 10 % der turbulenten kinetischen Energie produziert wird, was teilweise durch die starre Einspannung der Zylinder, die somit keine Schwingungen ausführen konnten, begründet ist. Auch Finigan (1979 a) beobachtete über wogendem Weizen solche hoch-

frequenten Peaks, deren Entstehung er Resonanzvorgängen, also der Turbulenzerzeugung durch die schwingenden Pflanzen, zuschrieb.

#### 4      Aufbau und Stabilität von Nadelbäumen

Die forstliche Forschung befaßte sich schon früh neben dem Wachstum des gesamten Bestandes auch mit dem eines einzelnen Baumes (u.a. Abetz, 1976). Die Erklärungen baumindividueller Wachstumsabläufe wurden größtenteils vor dem Hintergrund waldbaulicher Vorbeugungsmaßnahmen gegen Windbruchkatastrophen gegeben. In einem Teil dieser Untersuchungen wurde die Ausbildung der Baumschäfte als Träger der assimilierenden Krone und ihre Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen behandelt. Dies führte zur Entstehung mehrerer Schaftformtheorien, bei denen jeweils eine Teilfunktion des Schaftes seine gesamte Form erklären sollte. Assmann (1961) hat einige dieser Theorien zusammengestellt und bewertet, wobei an dieser Stelle aber nur die mechanische Schaftformtheorie kurz erläutert wird.

##### 4.1      Mechanische Schaftformtheorie

Die mechanische Schaftformtheorie geht davon aus, daß sich der Stamm eines freiwachsenden Baumes bei mechanischen Beanspruchungen wie eine Säule von gleichbleibender Festigkeit verhält. Dies läßt sich in allgemeiner Form durch mathematische Beziehungen für beliebige Holzarten und Baumformen ausdrücken, was später weiter ausgeführt wird. Am einfachsten kann man diese Zusammenhänge bei der Fichte beschreiben, da ihr Aufbau durch eine gewisse geometrische Strenge charakterisiert wird (Assmann, 1961). So variiert z.B. diese Baumart am wenigsten um ihre mittlere Schaftform (Pöytäniemi, 1981). Damit sind die Ergebnisse, die für ein bestimmtes Kollektiv von Bäumen erzielt wurden, mit relativ großer Genauigkeit auch auf andere Einzelbäume übertragbar.

Die ausgeglichene Schaftkurve einer 73-jährigen Fichte (*Picea abies*) ist in Abb. 10 dargestellt. Durch die Kurve wird die Abnahme des halben Stammdurchmessers  $d/2$  mit zunehmender relativer Höhe  $z/h$  beschrieben. Es zeigt sich eine Dreiteilung des Baumschaftes in Stammfuß, Mittelschaft und Oberschaft. Der

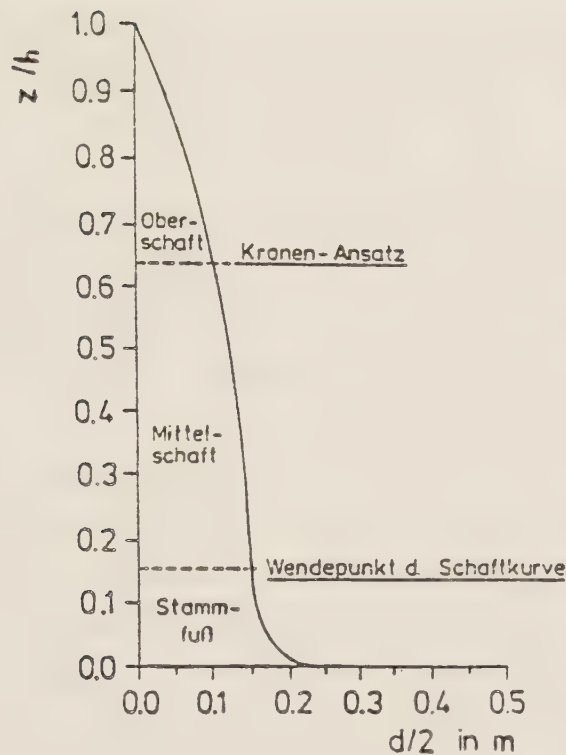


Abb. 10: Ausgeglichene Schaftkurve einer 73-jährigen Fichte (*Picea abies*);  $z/h$ : relative Höhe,  $h$ : Baumhöhe,  $d$ : Stammdurchmesser (nach Assmann, 1960)

Stammfuß besitzt die Form eines Neiloidstumpfes und erstreckt sich vom Wurzelanlauf bis zum Wendepunkt der Schaftkurve in einer Höhe  $z/h=0.15$ . Von hier ab hat die Schaftkurve die Gestalt eines Paraboloides, wobei das Paraboloid im Bereich des Mittelschaftes kubisch und im Bereich des Oberschaftes, also zwischen Kronenansatz und Baumgipfel, quadratisch gestaltet ist.

Diesen Verlauf einer Schaftkurve versuchte Metzger (1893) mit der Theorie, daß der Baumschaft ein Träger gleichen Widerstandes gegen die biegende Kraft des Windes sei, zu erklären. Ersetzt man den Winddruck durch eine Ersatzkraft, die auf eine senkrecht zur Strömungsrichtung projizierte Fläche angreift, dann ergibt sich für den Baumschaft die Form eines kubischen Paraboloides. Dabei wurde angenommen, daß sich die Biegespannungen linear auf den Stammquerschnitt verteilen und die Bie-

gefestigkeit des Holzes an jeder Stelle des Stammes konstant ist. Aufgrund dieser vereinfachenden Annahmen kann durch diese Theorie nur der astfreie Abschnitt der Schaftkurve hinreichend genau beschrieben werden, da hier der Wert des Biegemomentes unabhängig von der Belastungsverteilung auf der Kronenprojektionsfläche ist. Vergleiche mit heimischen Nadelbaumarten ergaben für den Mittelschaft eine gute Übereinstimmung zwischen dieser Theorie und Messungen (Assmann, 1961).

Windirsch (1936) bezog in seine Erklärung des Aufbaues einer Fichte (*Picea abies*) neben der Windbelastung auch die Belastungen durch das Eigengewicht des Stammes und durch das Gewicht der Krone mit ein. Zusätzliche Lasten durch Schnee oder Eisanhang rechnete er entweder zu den äußeren Kräften, wenn sie z.B. wie der Wind unter einem bestimmten Winkel zur Stammachse wirken, oder zu den Druckbeanspruchungen. Letztere wirken wie das Eigengewicht des Stammes längs der Stammachse. Aufgrund dieser Überlegungen schloß er, daß der Verlauf der Schaftkurve nur durch das Größenverhältnis dieser beiden Beanspruchungen bestimmt wird. Sind die durch Wind, Schnee oder Eisanhang hervorgerufenen äußeren Kräfte klein, so wird der Schaft vollholzig, was z.B. in einem geschlossenen Bestand beobachtet werden kann. In einem Plenterwald dagegen, wo die äußeren Kräfte groß sind, wird der Schaft eher abholzig sein. Mit seiner Theorie war es Windirsch (1936) auch möglich, den Verlauf des Schaftes innerhalb der Krone ausreichend gut zu beschreiben. Er wies aber darauf hin, daß durch seine Annahmen eine Erklärung der neiloidartigen Form der Schaftkurve am Stammfuß nicht möglich ist.

Fritzsche (1933) erklärte die Form des Stammfußes mit dessen Aufgabe, die Standsicherheit des Baumes ähnlich der Säulenversteifung im Bauwesen zu erhöhen. Der untere Stammabschnitt wird dabei durch den Wurzelanlauf derart verstärkt, daß die Zusammendrückung der äußersten Fasern im Stamm konstant ist, obwohl in diesem Bereich durch das Zusammenstoßen des Stammes mit den Wurzeln die Dehnung maximale Werte annimmt (Ylinen,

1952). Dies führt dazu, daß auch der untere Teil des Stammes einen Körper von gleicher Festigkeit gegen die Biegebeanspruchung darstellt.

Ylinen (1952) verbesserte den Stand der mechanischen Schaftformtheorie der Bäume, indem er u.a. die Verteilung des Winddruckes auf die Kronenfläche senkrecht zur Anströmungsrichtung und die Veränderung des Elastizitätsmoduls des Holzes längs des Stammes berücksichtigte. Da bei Ylinen (1952) für die Thematik der hier vorliegenden Untersuchung hilfreiche Zusammenhänge zwischen den verschiedenen mechanischen Eigenschaften eines Baumes enthalten sind, werden die entsprechenden Aussagen getrennt in den folgenden Abschnitten an jeweils geeigneter Stelle erläutert. In diesen Abschnitten werden neben den Eigenschaften auch die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung der betrachteten Baumteile angeführt.

#### 4.2 Mechanische Eigenschaften des Baumschaftes

In Abb. 10 ist die Abnahme des halben Durchmessers eines Fichtenstammes mit zunehmender Höhe dargestellt. Dieser Schaftkurve liegt die häufig gemachte Annahme zugrunde, daß Bäume kreisförmige Schaftquerschnitte besitzen. In der Regel existieren jedoch Abweichungen von der reinen Kreisform, wie z.B. Ovale (Tiren, 1928) oder Kombinationen von Kreisen und Parabeln (Müller, 1957, 1958). Dies kann bei Nadelhölzern durch Biegebeanspruchungen infolge äußerer Kräfte verursacht werden. Dabei tritt auf der Baumseite, die durch die Biegung konkav verformt und somit durch Faserstauchungen verkürzt wird, ein verstärktes Wachstum auf. Dieses Reaktionsholz, das bei Windwirkung auf der Leeseite ausgebildet wird, nennt man Druck- oder Rotholz (Assmann, 1961). Insbesondere besitzen die Schäfte der Randbäume von Fichtenbeständen sehr stark exzentrisch verformte Querschnitte, wobei die Richtung des größten Schaftdurchmessers in der am Standort am häufigsten auftretenden Windrichtung und der größte Radius des Schaftes auf der Leeseite des Baumes liegt (Fritzsche, 1929).

In der ertragskundlichen Praxis ist es weit verbreitet, das Baumvolumen aus dem Durchmesser  $d_{1.3}$  des Baumschaftes in 1.3 m Höhe über dem Boden - im forstlichen Sprachgebrauch als Brusthöhe bezeichnet - und aus der Baumhöhe  $h$  zu berechnen. Das Produkt aus der entsprechenden Grundfläche mit der Baumhöhe ergibt einen Zylinder, der auch 'Bezugswalze' genannt wird (Assmann, 1961). Das Verhältnis des tatsächlichen Baumvolumens  $v$  zu dieser Bezugswalze nennt man Brusthöhenformzahl  $f_{1.3}$ :

$$f_{1.3} = \frac{4 \cdot v}{\pi \cdot d_{1.3}^2 \cdot h} \quad (51)$$

Generell ist man jedoch eher interessiert, das Baumvolumen  $v$  zu bestimmen, was bei bekannter Formzahl mit Gl. (51) keine Schwierigkeiten bereitet. Zu diesem Zweck wurden Formzahltafeln oder Regressionsgleichungen, die  $d_{1.3}$ ,  $h$  und  $v$  miteinander verknüpfen, entwickelt, die in der forstlichen Praxis eine große Bedeutung besitzen. Neben der Brusthöhenformzahl sind in der Forstwirtschaft weitere Formzahlen gebräuchlich, die z.B. bei Assmann (1961) oder Prodan (1965) zusammengestellt sind, wobei auch die bei der Benutzung der verschiedenen Formzahlen auftretenden Fehler kritisch diskutiert werden.

Die elastischen Eigenschaften eines Baumschaftes können durch den Elastizitätsmodul  $E$  oder die Biegefestigkeit  $\sigma_B$  charakterisiert werden. Im Gegensatz zu Baustoffen, wie Stahl oder Beton, ist der Baumstamm keineswegs homogen, sondern er wechselt seine Rohdichte und seine Festigkeitseigenschaften innerhalb des Schaftes. So findet man schweres und festes Holz bei älteren Nadelbäumen vorwiegend im unteren Schaftteil und in den äußeren Mantelzonen (Assmann, 1961). Dies läßt erwarten, daß auch die Rohdichte am Basalende des Stammes größer als in den oberen Stammteilen ist. Da nach Kollmann und Krech (1960) ein niedriger Wert der Rohdichte einem niedrigen Elastizitätsmodul entspricht, wird diese Annahme auch durch die in Abb. 11 dargestellten Ergebnisse von Ylinen (1952) bestätigt. Aus den Längsverteilungen der Elastizitätsmoduln  $E$  einer Fichte (*Picea abies*) und einer Kiefer (*Pinus sylvestris*) läßt sich für beide

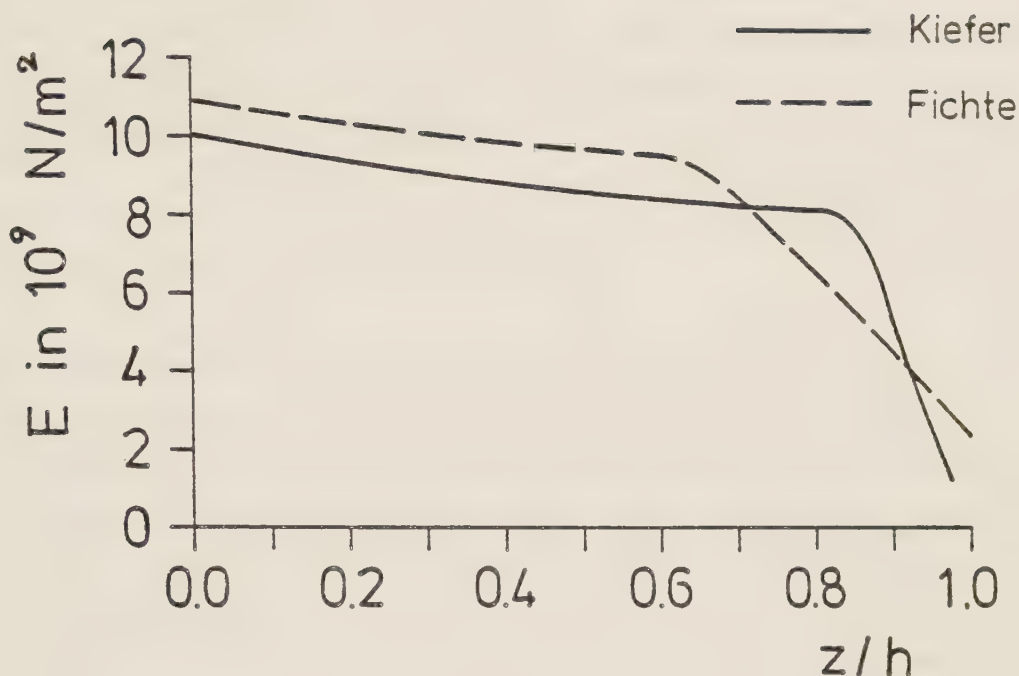


Abb. 11: Längsverteilung des Elastizitätsmoduls  $E$  bei einer Kiefer (*Pinus sylvestris*) und einer Fichte (*Picea abies*);  $z/h$ : relative Baumhöhe (nach Ylinen, 1952)

Baumarten die Abnahme von  $E$  vom Basalende ( $z/h=0.0$ ) zur Baumkrone ( $z/h=1.0$ ) hin entnehmen. Sowohl bei der Fichte (*Picea abies*) wie auch bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*) zeigt sich eine starke Abnahme des Elastizitätsmoduls erst im oberen Kronenbereich, während im Basalabschnitt und im Mittelteil des Stammes die Abnahme von  $E$  sehr gering ist. Bei diesen Ergebnissen muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß Ylinen (1952) von jeder Baumart nur ein Exemplar untersuchte, und die Fichte (*Picea abies*) unglücklicherweise in der gesamten Höhe bekront war.

Auf der Basis von Druckversuchen konnte Ylinen (1952) weiterhin nachweisen, daß bei einer Brucherscheinung des Holzes die Druckfestigkeit in Längsrichtung des Baumstammes nahezu konstant ist. Setzt man die Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes an der Bruchgrenze voraus, so folgt daraus auch eine Abnahme

Tab. 4: Mittelwerte der Rohdichte  $\rho_r$ , darrtrocken (= dt) und lufttrocken (= lt), der Biegefestigkeit  $\sigma_B$  und des Elastizitätsmoduls E parallel (= pa) und quer (= qu) zur Faserrichtung von verschiedenen Holzarten (nach Göhre, 1961; Knigge und Schulz, 1966)

|           | $\rho_r$              |      | $\sigma_B$           |     | E                    |     |
|-----------|-----------------------|------|----------------------|-----|----------------------|-----|
|           | dt                    | lt   | pa                   | qu  | pa                   | qu  |
|           | $10^3 \text{ kg/m}^3$ |      | $10^6 \text{ N/m}^2$ |     | $10^8 \text{ N/m}^2$ |     |
| Fichte    | 0.43                  | 0.46 | 76.5                 | 4.5 | 107.9                | 5.4 |
| Kiefer    | 0.49                  | 0.52 | 98.1                 | 5.6 | 117.7                | 4.5 |
| Tanne     | 0.40                  | 0.43 | 60.8                 | .-  | 107.9                | .-  |
| Douglasie | 0.47                  | 0.50 | 77.5                 | .-  | 112.8                | .-  |
| Lärche    | 0.55                  | 0.58 | 97.1                 | 7.4 | 135.4                | .-  |

der Biegefestigkeit des Holzes vom Basalende des Baumstammes zur Krone hin.

In Tab. 4 sind für einige Nadelholzarten die Mittelwerte der Rohdichte  $\rho_r$ , der Biegefestigkeit  $\sigma_B$  und des Elastizitätsmoduls E zusammengestellt. Definitionsgemäß sind die Rohdichten der Hölzer im darrtrockenen Zustand geringer als im lufttrockenen. Im lufttrockenen Zustand beträgt nämlich der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes 12 % und im darrtrockenen ca. 0.5 %, d.h. die Hohlräume im Holzkörper enthalten nahezu kein Wasser mehr. Außerdem schwankt die Rohdichte der Nadelhölzer wegen des einfacheren Aufbaues der Holzkörper in geringeren Grenzen als die der Laubhölzer (Ing. f. Holztechn., 1970). Bei der Biegefestigkeit  $\sigma_B$  und dem Elastizitätsmodul E zeigt sich, daß die Werte parallel zur Faserrichtung etwa um den Faktor 10 - 20 größer als quer zur Faserrichtung sind, was die holztechnisch große Bedeutung der Belastbarkeit parallel zur Faserrichtung unterstreicht (Kollmann und Krech, 1960). Diese Werte gelten bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 %. Fichten- und

Tannenhölzer besitzen im Vergleich zu anderen Nadelhölzern mit  $E \approx 10.8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  die geringsten Werte. Bestimmt man mit diesen Werten die Kenngrößen des Schwingungsverhaltens eines Baumes, so kann dies nur eine grobe Näherung darstellen, da z.B. die Elastizität des 'Systems Baum' nicht nur von den Holzeigenschaften des Stammes, sondern auch von der Wurzelung, der Krone und einigen anderen Faktoren abhängt.

Die Angaben von anderen Autoren zeigen für den Elastizitätsmodul von Nadelhölzern zum Teil große Abweichungen von den Werten in Tab. 4. So wurden z.B. für eine Sitkafichte (*Picea sitchensis*) bzw. eine Drehkiefer (*Pinus contorta* var. *contorta*) ermittelt:  $E \approx 6.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  bzw.  $E \approx 6.5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  (Lavers, 1967; zit. bei Mayhead et al., 1975).

#### 4.3 Mechanische Eigenschaften der Baumkrone

Die Größe der auf einen Baum wirkenden Windkraft wird neben den Parametern des Windfeldes auch durch die Eigenschaften und Ausformungen der Baumkrone bestimmt. Im Vergleich dazu kann die Windkraft, die auf einen Baumstamm wirkt, vernachlässigt werden (Mayer, 1985). Die vom Wind ausgeübte Kraft  $F$ , die auf die Projektionsfläche  $A$  der Baumkrone senkrecht zur Anströmungsrichtung wirkt, ist proportional zum Widerstandsbeiwert  $c_d$ , der die aerodynamischen Eigenschaften der Baumkrone repräsentiert. Der Widerstandsbeiwert kann aus Windkanalversuchen an einem unbewegten Körper über Gl. (52) bestimmt werden (Mayhead et al., 1973 a):

$$c_d = \frac{F}{A \cdot 0.5 \cdot \rho_1 \cdot u_h^2} \quad (52)$$

Darin bedeuten  $\rho_1$  die Luftdichte und  $u_h$  die horizontale Windgeschwindigkeit, die im Windkanal mit der dort herrschenden Strömungsgeschwindigkeit gleichgesetzt wird.

Die Ermittlung der senkrecht zur mittleren Anströmungsrichtung projizierten Kronenfläche  $A$  eines Baumes ist schon bei unbe-

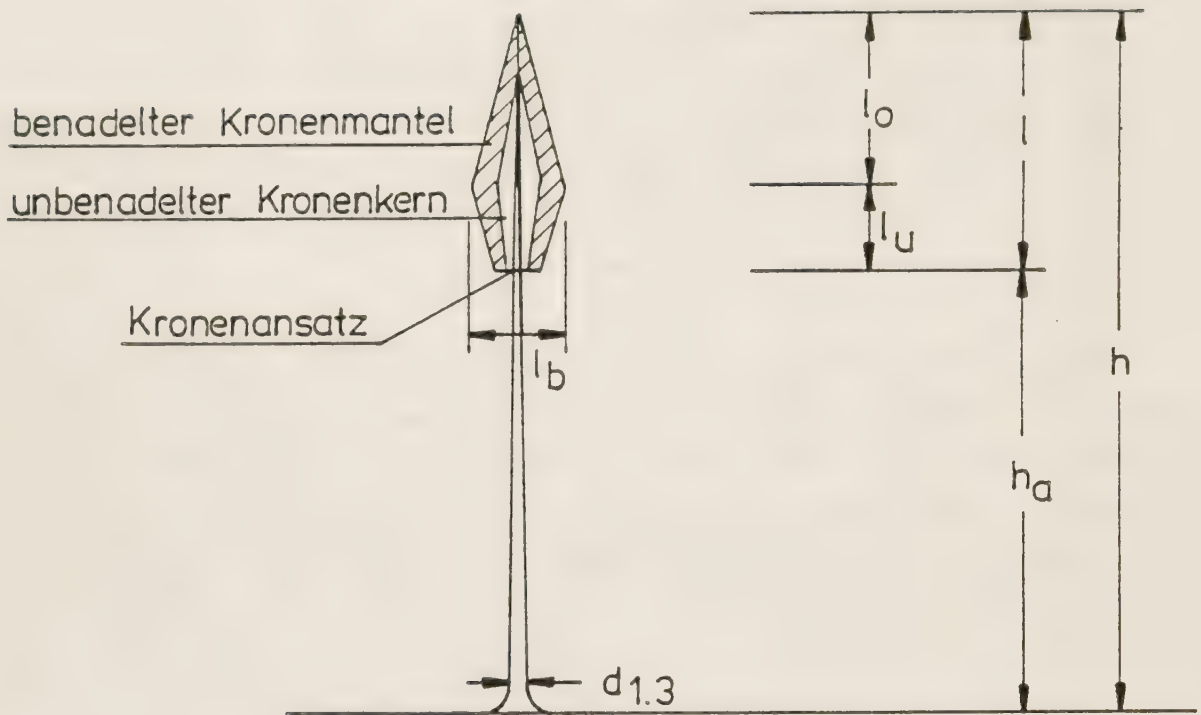


Abb. 12: Modell einer idealisierten Fichtenkrone;  $d_{1.3}$ : Brusthöhendurchmesser,  $h$ : Baumhöhe,  $h_a$ : Höhe des Kronenansatzes,  $l$ : Kronenlänge,  $l_o$ : Länge der Lichtkrone,  $l_u$ : Länge der Schattenkrone,  $l_b$ : größte Kronenbreite (nach Burger 1939 a)

wegter Luft schwierig. Man kann sie entweder aus Kronenlänge und Kronendurchmesser abschätzen oder photographisch bestimmen. Bei Windkanaluntersuchungen können grundsätzlich beide Methoden angewendet werden, während unter Freilandbedingungen im allgemeinen nur die erste Methode durchführbar ist (Mayhead et al., 1975). Deshalb wird im folgenden ein Kronenmodell von Burger (1939 a) für herrschende Bäume aus gut geschlossenen, mäßig durchforsteten Beständen kurz erläutert (Abb. 12), mit dessen Hilfe die angesprochene Abschätzung durchgeführt werden kann.

Die idealisierten Längsschnitte der Kronen von Fichten und Kiefern liefern bei einer Umdrehung um die Schaftachse von  $180^\circ$  Drehparaboloide unterschiedlicher Form (Assmann, 1961).

Tab. 5: Kennmaße des Modells einer Fichten- und einer Kiefernkrone; Erklärung der Bezeichnungen siehe Abb. 12 (nach Assmann, 1961)

|        | $l/h$ | $l_b/h$ | $l_o/l$ | $l_u/l$ | $l_b/l$ | $l_b/d_{1.3}$ |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Fichte | 0.37  | 0.14    | 0.65    | 0.35    | 0.38    | 10.0          |
| Kiefer | 0.32  | 0.22    | 0.65    | 0.35    | 0.68    | 12.9          |

In Tab. 5 sind die prinzipiellen Unterschiede zwischen einer idealisierten Fichten- und Kiefernkrone zusammengestellt. Bei beiden Baumarten liegt der größte Kronendurchmesser in einer Höhe von etwa einem Drittel der gesamten Kronenlänge  $l$  über der Kronenansatzhöhe  $h_a$ . In der Höhe des größten Kronendurchmessers endet die Schattenkrone mit der Länge  $l_u$  und beginnt die Lichtkrone mit der Länge  $l_o$ . Die Formen der Lichtkrone variieren zwischen einem geraden Kreiskegel und einem quadratischen Paraboloid. Die Schattenkrone kann in guter Näherung als Paraboloidstumpf betrachtet werden (Assmann, 1961). Wie den Werten für das Verhältnis  $l_b/l$ , dem Plumpheitsgrad der gesamten Krone, aus Tab. 5 zu entnehmen ist, besitzt die Fichte (*Picea abies*) in der Regel schlankere Kronen als die Kiefer (*Pinus sylvestris*). Die im Vergleich zu den Fichtenkronen größere Plumpheit der Kiefernkronen geht auf die geringere Kronenlänge der Kiefern zurück (Assmann, 1961).

Zur Abschätzung des Inhaltes einer Fichtenkrone benutzt man im allgemeinen die entsprechende Gleichung für das Volumen eines geraden Kreiskegels. Um den damit gemachten Fehler zu verringern, wird die Gleichung mit einer empirischen Formzahl  $f_k$  multipliziert. Diese Kronenformzahl nimmt bei der Fichte (*Picea abies*) Werte im Bereich zwischen 0.3 und 0.6 an. Die in Abb. 12 dargestellt Zweiteilung einer Fichtenkrone berücksichtigte u.a. Burger (1939 b), indem er bei der Berechnung des Inhaltes einer Fichtenkrone für die Licht- und Schattenkrone jeweils unterschiedliche Formzahlen verwendete. Hierbei

benutzte er für die Schattenkrone eine höhere Formzahl als für die Lichtkrone, um der gedrungeneren Gestalt der Schattenkrone Rechnung zu tragen. Diese Unterscheidung wird hier nicht durchgeführt, so daß der gesamte Kroneninhalt  $I$  durch Gl. (53) abgeschätzt werden kann (Assmann, 1961):

$$I = f_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l_b^2 \cdot l \quad (53)$$

Die Fläche  $A$  der Baumkrone senkrecht zu einer horizontalen Anströmungsrichtung ergibt sich daraus als Fläche eines gleichschenkligen Dreiecks, die mit einem Korrekturfaktor  $f'_k$  multipliziert werden muß:

$$A = f'_k \cdot l_b \cdot l \quad (54)$$

Für die Fichte (*Picea abies*) erhält man aus dem Wertebereich der Kronenformzahl  $f_k$  für den Korrekturfaktor  $f'_k$  einen Bereich zwischen 0.5 und 1.0.

Nahezu alle Nadelbaumarten, die in der Natur oder im Windkanal dem Wind ausgesetzt sind, orientieren ihre einzelnen Nadeln oder ganze Äste stromlinienartig in die Strömungsrichtung. Dies führt zu einer Veränderung des Umrisses und der Durchlässigkeit der Baumkrone (Ylinen, 1952; Fraser, 1962; Monteith, 1978). Da insbesondere die nun entstandene neue Kronenform und damit auch die geänderte Windangriffsfläche sehr schwierig zu bestimmen sind, benutzt man in Gl. (52) einen mit der horizontalen Windgeschwindigkeit veränderlichen Widerstandsbeiwert  $c_d$ . Unter der Annahme, daß durch einen solchen Widerstandsbeiwert alle von der Windgeschwindigkeit abhängigen Veränderungen der Baumkrone beschrieben werden, kann für  $A$  in Gl. (52) der Zusammenhang aus Gl. (54) verwendet werden. Somit ist es bei bekanntem  $c_d$  möglich, die Kraft  $F$  über Gl. (52) aus Messungen der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  sowie der größten Kronenbreite  $l_b$  und der Kronenlänge  $l$  zu bestimmen.

Eine ähnliche Vorgehensweise benutzte Mayhead (1973 b) zur Er-

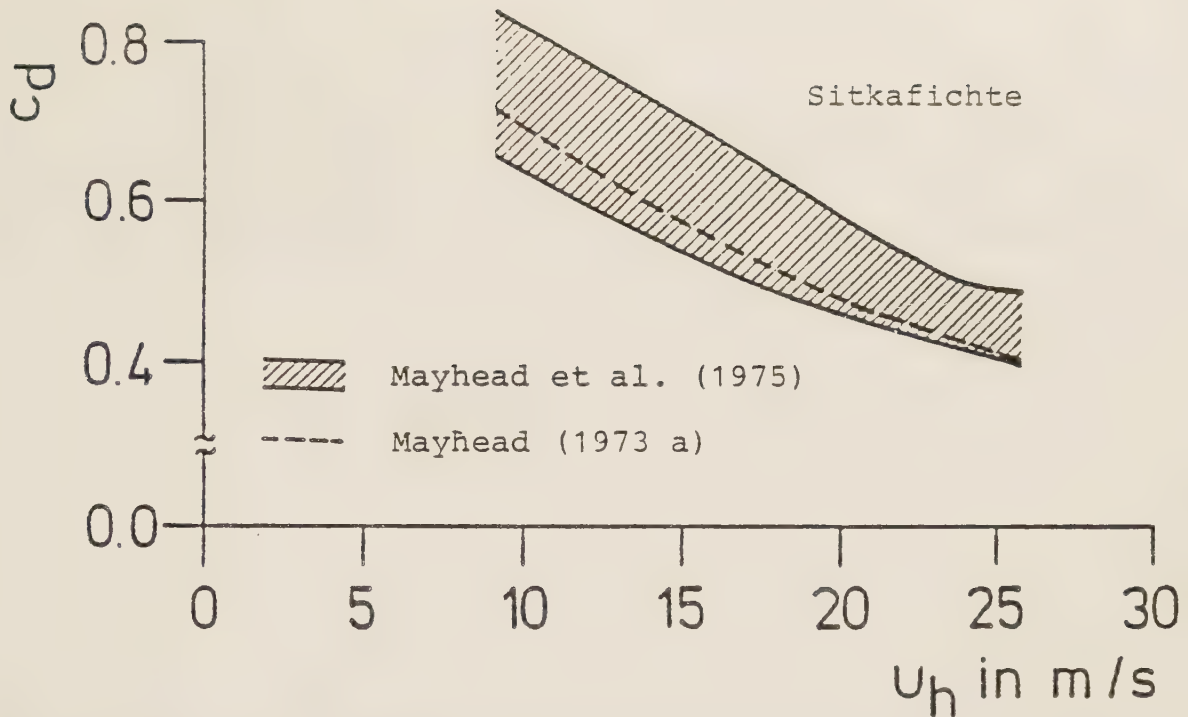


Abb. 13: Widerstandsbeiwert  $c_d$  von Sitkafichten (*Picea sitchensis*) in Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  (nach Mayhead, 1973 a; Mayhead et al., 1975)

mittlung des Widerstandsbeiwertes  $c_d$  von verschiedenen Nadelbaumarten. Dabei fand Mayhead (1973 b) unter Berücksichtigung aller bedeutenden auftretenden Fehler, daß die Verwendung einer von  $u_h$  unabhängigen Kronenprojektionsfläche  $A$  zu keinen schwerwiegenden Fehlern bei seinen Ergebnissen führte.

In Abb. 13 sind die Widerstandsbeiwerte  $c_d$  in Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  dargestellt, die von Mayhead (1973 a) und Mayhead et al. (1975) für Sitkafichten (*Picea sitchensis*) aus Windkanaluntersuchungen ermittelt wurden. Durch die Schraffierung wird ein Bereich von  $c_d$ -Werten gekennzeichnet, den Mayhead et al. (1975) aus Messungen an acht verschiedenen Einzelbäumen erhalten hatten. Außerdem gibt Abb. 13 den Verlauf der  $c_d$ -Werte für eine einzelne Sitkafichte (*Picea sitchensis*) nach Messungen von Mayhead (1973 a) wieder. Prinzipiell zeigt sich die Abnahme des Widerstandsbeiwertes mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Die Streuung der

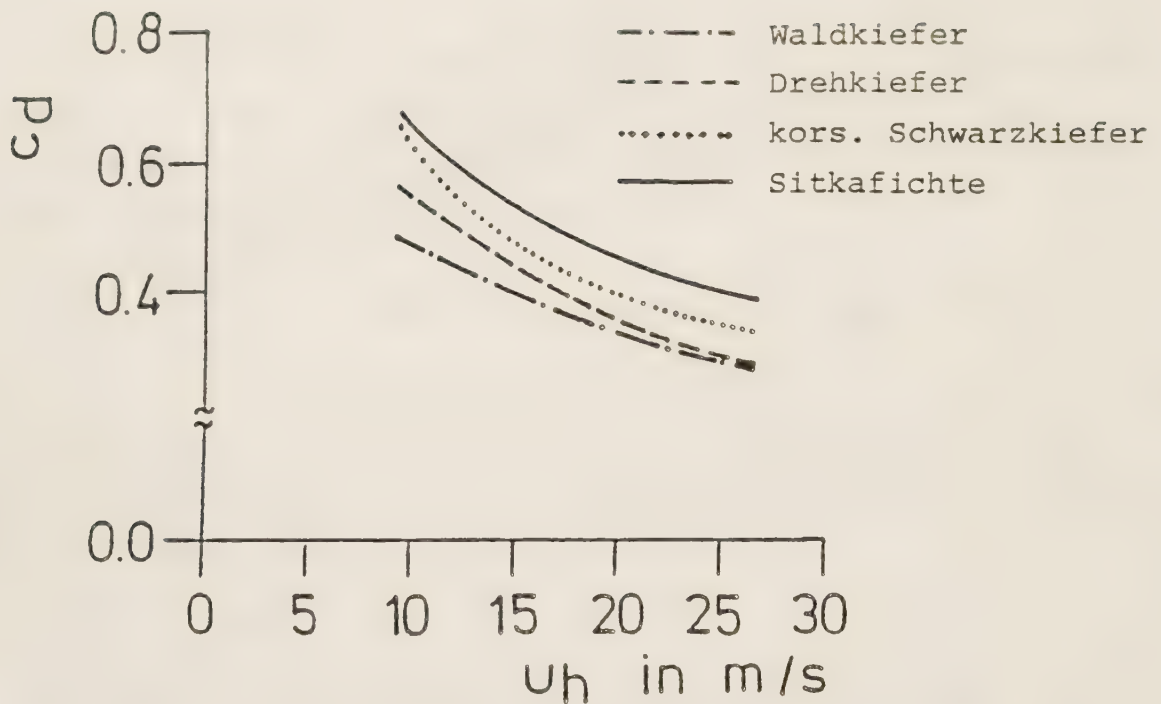


Abb. 14: Widerstandsbeiwert  $c_d$  in Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  für die Baumarten Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Drehkiefer (*Pinus contorta* var. *contorta*), korsische Schwarzkiefer (*Pinus nigra* var. *maritima*) und Sitkafichte (*Picea sitchensis*) (nach Mayhead, 1973 b)

$c_d$ -Werte bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ist dabei größer als bei hohen. Dies weist auf den mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnehmenden Einfluß der Kronenveränderungen der Einzelbäume auf die  $c_d$ -Werte hin.

Die Abhängigkeit der Widerstandsbeiwerte verschiedener Nadelbaumarten von der horizontalen Windgeschwindigkeit ist in Abb. 14 zusammengestellt. Im Vergleich zur Abb. 13 zeigt sich, daß die Unterschiede der  $c_d$ -Werte zwischen verschiedenen Baumarten fast die gleiche Größenordnung besitzen, wie die Variation der Widerstandsbeiwerte innerhalb einer Baumart. Die Streuung der Widerstandsbeiwerte wird durch die soziale Stellung des Einzelbaumes im Bestand, durch die Bonitätsklasse des Bestandes, durch den Wasserhaushalt und durch das Nährstoffangebot beein-

flußt (Mayhead, 1973 a).

Bei der Berechnung der auf einen Baum wirkenden Windkraft berücksichtigten Mayhead et al. (1975) neben der Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der horizontalen Windgeschwindigkeit auch die Baummasse, die sie mit der Masse des Astreisigs parametrisierten. So erhielten sie für Sitkafichten (*Picea sitchensis*) folgende empirische Größengleichung zwischen der vom Wind ausgeübten Kraft  $F$  (in N), der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  (in m/s) und der Masse des Astreisigs  $m_a$  (in kg):

$$F = 0.43502 \cdot u_h^2 \cdot m_a^{\frac{2}{3}} \cdot \exp(-0.0009779 \cdot u_h^2) \quad (55)$$

Auch Fraser (1964) versuchte aufgrund von Windkanaluntersuchungen, einen empirischen Zusammenhang zwischen der vom Wind auf einen Baum ausgeübten Kraft  $F$  und der Baummasse  $m$  zu ermitteln. Ausgehend von der Annahme, daß die Größen  $c_d$  und  $A$  hinreichend gut mit der Baummasse  $m$  parametrisiert werden können, erhielt er für  $u_h \geq 10.0$  m/s die in Gl. (56) angeführte Größengleichung zur Berechnung von  $F$  (in N):

$$F = 12.46 \cdot u_h + 0.52 \cdot u_h \cdot m - 3.22 \cdot m + 33.06 \quad (56)$$

In Gl. (56) müssen die horizontale Windgeschwindigkeit  $u_h$  in m/s und die Baummasse  $m$  in kg angegeben werden. Mit dieser Gleichung ist somit eine Bestimmung der vom Wind auf einen Baum ausgeübten Kraft ohne Kenntnis von  $c_d$  und  $A$  möglich.

Dies soll am Beispiel einer Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), deren Masse und Kronenprojektionsfläche in Tab. 19 enthalten sind, anhand der Ergebnisse von Mayhead (1973 b) aus Abb. 14 geprüft werden. Hierzu wird die Kraft  $F$  sowohl nach Gl. (52) als auch nach Gl. (56) für  $u_h = 10.0$  m/s und  $u_h = 25.0$  m/s berechnet. Die entsprechenden  $c_d$ -Werte für eine Waldkiefer sind nach Abb. 14  $c_d = 0.5$  und  $c_d = 0.3$ . Mit einer Luftdichte  $\rho_l = 1.29$  kg/m<sup>3</sup> ergeben sich aus Gl. (52) für  $u_h = 10.0$  m/s:  $F = 677$  N und für

$u_h = 25.0 \text{ m/s}$ :  $F = 2540 \text{ N}$ . Die entsprechenden Kräfte, die nach Gl. (56) ermittelt wurden, betragen  $F = 654 \text{ N}$  bzw.  $F = 2798 \text{ N}$ . Die Übereinstimmung ist im Rahmen der durchgeführten Abschätzungen sehr gut und zeigt, daß prinzipiell in dem Bereich der horizontalen Windgeschwindigkeiten  $10.0 \text{ m/s} \leq u_h \leq 25.0 \text{ m/s}$  Gl. (56) eine gute Näherung für Gl. (52) darstellt. In allgemeinerer Form wird diese Aussage durch die in Abschnitt 8.1 angeführten Ergebnisse bestätigt, weshalb die Diskussion dieser Zusammenhänge nicht mehr weitergeführt wird.

#### 4.4 Wurzelung und Boden

Eine der Hauptfunktionen der Wurzeln ist die Verankerung des Baumes im Boden. Somit ist im Hinblick auf die Windwurfgefahr neben dem physikalischen Bodenzustand die Ausbildung der Wurzeln in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften von erheblicher Bedeutung für die Stabilität eines Einzelbaumes.

Die vom Wind hervorgerufenen Einwirkungen auf die Wurzeln der Bäume nehmen mit dem Alter, der Angriffsfläche und der Auflichtung der Bestände zu, wobei die Reaktion der Bäume von der Art und dem physikalischen Zustand des Bodens abhängt. Wo bereits ein tiefgründiger, skelettreicher, gut durchlüfteter Boden die Ausbildung von Pfahl- und Senkerwurzeln ermöglicht, werden diese leichter und wirkungsvoller verstärkt und versteift werden als in skelettarmen Feinlehm Böden. Letztere verlieren bei starker Durchfeuchtung ihre Stabilität, so daß sogar in Laubbeständen umfangreiche Windwürfe möglich sind (Köstler et al., 1968).

Obwohl die Standortsverhältnisse die Wurzeln der Bäume stark verändern können, werden im folgenden die Grundformen der Wurzelung der Nadelbaumarten Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) näher erläutert, da aus der Kenntnis dieser Ausformungen prinzipielle Aussagen zur Stabilität der beiden Baumarten möglich sind.

#### 4.4.1 Wurzelung der Fichte

Die Fichte (*Picea abies*) bildet bei ungehemmter Entwicklung ein typisches Senkerwurzelwerk aus, das von den verschiedenen, im Boden vorkommenden Faktoren am stärksten durch die Sauerstoffverhältnisse beeinflusst wird (Köstler et al., 1968). Je schwächer bzw. schlechter die Bodendurchlüftung ist, um so flacher ist die Wurzelung der Fichte (*Picea abies*).

Mit dem Einfluß der Sauerstoffversorgung sind fast untrennbar die Bodenwasserverhältnisse verbunden. Über gestautem, sauerstoffarmem Wasser entsteht ein extrem flaches Wurzelwerk mit nur kurzen Senkerwurzeln, die unter starker Aufzweigung über dem Grundwasserspiegel wie abgeschnitten wirken und in höherem Alter häufig absterben (Schmidt-Vogt, 1977). Mit absinkendem Grundwasserspiegel, wie auf grundwasserfernen oder grundwasserfreien Sandstandorten, ziehen von dem oberflächennah angelegten, tellerartigen Horizontalwurzelsystem Senkerwurzeln teilweise bis in eine Tiefe von 4.5 m (Wagenknecht, 1955).

Ist keine Tiefendurchwurzelung möglich, wird das Horizontalwurzelsystem verlängert und zur Stabilisierung des Stammes im Wurzelanlauf brettartig verdickt, so daß die Fichte (*Picea abies*) nicht mehr im Boden wurzelt, sondern auf ihm steht (Wagenknecht und Belitz, 1959). Diese Wurzelanläufe zeigen sich am Stamm von älteren Nadelbäumen in Einzelfällen bis zu einer Höhe von 1 m über Grund und mehr. Am Stammfuß bilden sie regelrechte Stützdreiecke mit hoher statischer Wirksamkeit aus, auf deren besondere Bedeutung für die Standfestigkeit schon Fritzsche (1933) hinwies. So ist in älteren, aufgelockerten, wenig tiefwurzelnden Fichtenbeständen die Hauptwindrichtung häufig durch leeseitig besonders stark entwickelte Stützwurzeln angedeutet (Köstler et al., 1968).

Aus dieser Kennzeichnung des Wurzelwerkes läßt sich erkennen, daß die Windwurfgefährdung der Fichte (*Picea abies*) am stärksten auf allen schlecht sauerstoffversorgten, vernäßten und

dichtgelagerten Sand-, Lehm- und Tonböden (Pseudogley, Stagnogley), auf trockenen, nährstoffarmen, podsolierten Sandböden und auf dichtgelagerten, schiefrigen Skelettböden ist (Köstler et al., 1968). Verstärkt wird die Gefährdung auf solchen Standorten, wenn sie eine mächtige Rohhumusaufgabe aufweisen, weil dadurch die Fichte (*Picea abies*) noch zusätzlich abgehalten wird, in tiefere Bodenschichten vorzudringen.

Auf gewissen Standorten darf die zusätzliche Bedrohung der Fichte (*Picea abies*) durch die Wurzelfäule (*Fomes annosus*) nicht vernachlässigt werden. Sie ist am häufigsten auf kalkreichen Böden zu beobachten, wobei ihr Auftreten auf Störungen des Bodenwasserhaushaltes, wie zeitweiser Bodentrockenheit, zurückgeführt werden kann (Priehäusser, 1943). Die Wurzelfäule (*Fomes annosus*) führt zum Absterben der Tiefenwurzeln, wodurch die Verankerung der Fichte (*Picea abies*) in tieferen Schichten nahezu aufgehoben wird. Im Spätherbst oder zur Zeit der Schneeschmelze, wenn der Boden mit Wasser übersättigt ist, sind dann so geschädigte Bäume im höchsten Maß windwurfgefährdet. Außerdem führt die Wurzelfäule (*Fomes annosus*) zur Ausbildung neiloidförmiger Kronen, die die Widerstandsfähigkeit gegen die Sturmgefahren weiter herabsetzen (Priehäusser, 1943).

#### 4.4.2 Wurzelung der Kiefer

Im Gegensatz zur Fichte (*Picea abies*) bildet die Kiefer (*Pinus sylvestris*) bei ungehemmter Entwicklung eine im Wurzelbild dominierende Pfahlwurzel aus. Mit zunehmendem Alter und größerer Schaftstärke läßt die Zunahme des Pfahlwurzel durchmessers nach, und es wird ein Wurzelstock ausgebildet, so daß häufig keine Pfahlwurzel mehr zu erkennen ist (Köstler et al., 1968). Kennzeichnend für die Ausbildung des Wurzelstockes bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*) ist weiter die strenge Trennung zwischen horizontal liegenden Wurzeln und Vertikalwurzeln, was auch im Wurzelwerk der Fichte (*Picea abies*) beobachtet werden kann. Schräge Wurzeln sind nur selten anzutreffen. Besonders

in den Fällen, in denen statt einer Pfahlwurzel Senkerwurzeln ausgebildet sind, erhält das Wurzelwerk ein gitterartiges Aussehen.

Von primärer Bedeutung für die Ausbildung des Wurzelwerkes ist auch bei der Kiefer (*Pinus sylvestris*) die Bodenart. Daneben spielt, wie auch bei der Fichte (*Picea abies*), in enger Wechselwirkung mit der Bodenlagerung der Wasserhaushalt eine große Rolle. So kommen auf Pseudogley Pfahlwurzeln nur in der Jugend vor, die allerdings schon frühzeitig in 0.2 - 0.3 m Bodentiefe aufzweigen.

Zusammenfassend folgt daraus, daß die Form der Kiefernwurzeln um so gestauchter und die Aufzweigungstendenz um so stärker sind, je dichter der Boden, je höher der Skelettanteil, je stärker die Pseudogleydynamik und je schärfer die Trockenphase ausgeprägt sind (Biebelriether, 1964). Auf nährstoffreichen Böden kommt hinzu, daß sich die Seitenwurzeln früh aufzweigen, sich rasch verzweigen und deshalb nur eine geringe Reichweite erlangen. Insgesamt nimmt hier die Kiefer (*Pinus sylvestris*) nur einen relativ kleinen Bodenraum in Anspruch, der allerdings sehr intensiv durchwurzelt wird. Auf solchen Standorten ist die Kiefer (*Pinus sylvestris*) mit auffallend kleinen, halbkugeligen Wurzelballen windwurfgefährdet (Köstler, 1956).

Ebenso wie die Fichte (*Picea abies*) entwickelt die Kiefer (*Pinus sylvestris*) bei gehemmter Tiefenbewurzelung aus den oberflächlichen Seitenwurzeln Stützwurzeln. Dabei stehen sich die stärksten, abgeplatteten Stützwurzeln jeweils genau gegenüber, wobei sie an den Bäumen, die weniger Vertikalwurzeln aufweisen, besonders stark und häufig ausgebildet werden (Laitakari, 1929). Weiterhin wies Laitakari (1929) darauf hin, daß die Druckfestigkeit des Wurzelholzes der Kiefer (*Pinus sylvestris*) in radialer Richtung zwei- bis dreimal kleiner als seine Zugfestigkeit ist. Deshalb müssen die besonders druckbeanspruchten Stützwurzeln stärker dimensioniert sein. Zusätzlich kann

die Standfestigkeit bei ungenügender Tiefenbewurzelung dadurch erhöht werden, daß die flachen Seitenwurzeln untereinander verwachsen. Dies konnte Laitakari (1929) an einer auf einem Tonboden stockenden Kiefer (*Pinus sylvestris*), die ein flaches, sehr dichtes, flechtwerkartiges Wurzelwerk ausgebildet hatte, feststellen.

#### 4.4.3 Wurzelbeanspruchungen durch Einwirkungen des Windes

Hintikka (1972) untersuchte den Einfluß des Windes auf die Wurzelbewegungen der Nadelbaumarten Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*). Er beobachtete, daß sich schon bei einer geringen Stammneigung die Wurzeln erheblich im Boden heben, wobei die Hebung auf Moorboden stärker als auf Lehm war und im Vergleich dazu auf Sand die geringsten Werte annahm. Die Fichte reagierte dabei sehr viel stärker als die Kiefer. Dies bestätigt auch die starke Abhängigkeit der Sturmgefährdung von Nadelbäumen von dem im Boden vorhandenen Wasser (Hütte, 1967; Wangler, 1974; Mitscherlich, 1981). Dabei verringert sich mit zunehmender Bodenfeuchtigkeit der Reibungswiderstand, der dem Herausdrehen der Wurzeln entgegenwirkt. Auch Böden, die im allgemeinen feste Ankerungsmöglichkeiten für die Wurzeln bieten, können durch langandauernde Regen oder Schneeschmelze so durchnäßt werden, daß Windwurf begünstigt wird (Geiger, 1950; Schwerdtfeger, 1970).

Den Einfluß des Bodentyps und damit auch des Bodenwassergehaltes auf die Sturmgefährdung analysierten Fraser und Gardiner (1967) an mehreren, etwa 12 m hohen Sitkafichten (*Picea sitchensis*) im englischen Küstengebiet. Sie untersuchten deren Widerstandsfähigkeit gegen Windlasten mit Hilfe von Zugversuchen. Der von ihnen gefundene Zusammenhang zwischen Biegemoment  $M_b$  am Stammfuß und dem Auslenkungswinkel  $\theta$  aus der Vertikalen ist für zwei Bodentypen in Abb. 15 dargestellt. Sowohl auf Braunerde wie auch auf Moorgley nimmt das durch den Zug ausgeübte Biegemoment  $M_b$  bis zu einem kritischen Auslenkungswinkel zu, um dann wieder abzunehmen. Diese Abnahme des ausge-

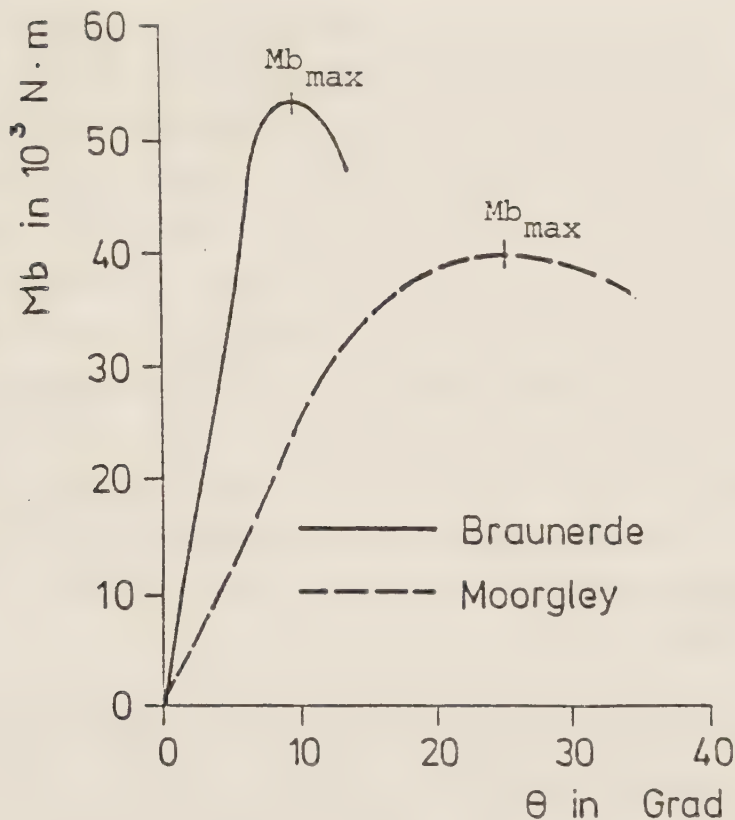


Abb. 15: Biegemoment  $M_b$  am Stammfuß als Funktion des Neigungswinkels  $\theta$  von Sitkafichten (*Picea sitchensis*) auf Braunerde und Moorgley (nach Fraser und Gardiner, 1967)

übten Biegemomentes ist einerseits auf den zunehmenden Anteil des Biegemomentes, das durch die ausgelenkten oberen Stammteile verursacht wird, und andererseits auf das beginnende Abreißen der Wurzeln zurückzuführen. Auf Braunerde beginnt dieser Vorgang schon bei einem Auslenkungswinkel  $\theta = 10^\circ$ , während auf Moorgley der Baum erst bei einem Winkel  $\theta = 25^\circ$  nicht mehr in der Lage ist, selbständig in seine Ausgangslage zurückzukehren. Außerdem bemerkten Fraser und Gardiner (1967) während ihrer Untersuchungen, daß nach mehrmaligen Zugversuchen die Bäume nicht mehr in ihre ursprüngliche Ausgangslage zurückkehrten, sondern in leicht ausgelenkter Stellung verharrten. Daraus läßt sich auf eine Lockerung und teilweise Zerstörung der beanspruchten Wurzelteile schließen, auf die schon Hütte (1967) in seiner anschaulichen Beschreibung des Wurfvorganges von Bäumen durch windinduzierte Schwingungen hingewiesen hat.

Auch Fraser (1962) beschrieb eine Methode, um die Faktoren, die die Stabilität von Bäumen beeinflussen, durch Zugversuche zu bestimmen. Durch seine Messungen konnte er die qualitativen Aussagen Priehäussers (1943) zur Herabsetzung der Baumstabilität durch Wurzelfäule (*Fomes annosus*) quantifizieren. In einem Mischbestand aus Kiefern (*Pinus sylvestris*) und Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*), der auf einem Sandboden über Kalk stockte, konnte er nachweisen, daß die Widerstandsfähigkeit eines Baumes gegen eine Entwurzelung durch die Wurzelfäule (*Fomes annosus*) um ein Drittel herabgesetzt wird. Weiterhin zeigte er, daß durch Entwässerungsmaßnahmen auf flachen Torfböden die Widerstandsfähigkeit von Bäumen um ein Viertel erhöht werden kann.

Als Kriterium für die Entwurzelung eines Baumes definierte Fraser (1962) ein maximales Biegemoment  $M_{b_{\max}}$ . Dieses Moment ist dann erreicht, wenn das Eigengewicht des Baumes den dominierenden Anteil des gesamten die Entwurzelung hervorrufenden Momentes bedingt. Dieser Punkt ist als Wendepunkt in den Kurven in Abb. 15 eingetragen. Zur Berechnung des maximalen Biegemomentes  $M_{b_{\max}}$  aus dem Baumgewicht  $m \cdot g$ , der maximalen Zugkraft  $F_{\max}$  im Wendepunkt der Kurven in Abb. 15 und dem zugehörigen Auslenkungswinkel  $\theta_{\max}$  verwendete Fraser (1962) die folgende Gleichung:

$$M_{b_{\max}} = \frac{h}{3} \cdot (F_{\max} \cdot \cos \theta_{\max} + m \cdot g \cdot \sin \theta_{\max}) \quad (57)$$

Daraus ersieht man sofort die Zunahme des maximalen Biegemomentes  $M_{b_{\max}}$  mit zunehmender Baumhöhe  $h$ . Setzt man  $F_{\max}$  gleich einer kritischen Belastung  $F_{kr}$ , die in der Elastizitätslehre als die Belastung, bei der ein Träger knickt, definiert wird, so läßt sich mit Gl. (58) das maximale Biegemoment nur aus Baumparametern berechnen (Windirsch, 1936):

$$F_{kr} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{E \cdot J}{h^2} \quad (58)$$

In Gl. (58) bedeuten  $E$  den Elastizitätsmodul,  $J$  das Flächenträgheitsmoment und  $h$  die Baumhöhe. Diese Gleichung wird in der Elastizitätslehre als Eulersche Knickformel bezeichnet.

## 5 Windbelastung von Bäumen

Bei meteorologischen Untersuchungen des bodennahen Windfeldes steht im allgemeinen die Beschreibung seiner Veränderung durch Einzelpflanzen (z.B. Baumgartner, 1961) oder durch ganze Bestände (u.a. Wölflé, 1942; Finnigan und Mulhearn, 1978) im Vordergrund. Die Wirkungen des Windfeldes auf die Pflanzen, insbesondere ihre Schädigung durch Starkwinde oder Stürme, wurde dagegen bisher nur selten untersucht (Holbo et al., 1980; Mayer, 1985).

In der Bauphysik ist die Vorausberechnung der Bauwerksschwingungen bei der Auslegung großer Bauwerke unabdingbar. Da z.B. turmartige Bauwerke durch Windlasten maßgeblich belastet werden, wurden Methoden entwickelt, die es gestatten, bei bekannter Windbelastung die Reaktion eines Bauwerkes in Abhängigkeit von seinen Abmessungen und Materialeigenschaften zu berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine dieser Methoden, die Spektralmethode, angewendet, um die Reaktion von Nadelbäumen auf Windlasten zu ermitteln.

Zunächst werden Nadelbäume als Zylinder mit kreisförmigem Querschnitt betrachtet und die typischen physikalischen Zusammenhänge erläutert. Später werden spezielle Effekte berücksichtigt, die durch die Form, Größe, Verankerung und das dynamische Verhalten des untersuchten Baumes bedingt sind.

### 5.1 Allgemeines

Ein kreisförmiger, querangeströmter Körper erfährt neben dem Strömungswiderstand auch periodische Kräfte in und quer zur Anströmungsrichtung. Ist der angeströmte Körper elastisch, dann können hierdurch bei bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten Schwingungen mit beträchtlichen Amplituden induziert werden, die im ungünstigsten Fall zur Zerstörung des Körpers führen.

Grundsätzlich unterscheidet man bei elastischen Körpern zwischen Biege-, Torsions- und Longitudinalschwingungen. Diese Schwingungsformen treten sowohl getrennt als auch gekoppelt auf. Wie schon im zweiten Kapitel erwähnt, besitzen die Biegeschwingungen für die windinduzierten Baumschwingungen die größte Bedeutung. Torsionsschwingungen treten relativ selten auf, so z.B. bei einmaligen, sehr starken Windböen (Mayer, 1985), während die Longitudinalschwingungen im Hinblick auf die Baumbelastungen zu vernachlässigen sind. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb vereinfachend angenommen, daß Bäume ausschließlich Biegeschwingungen ausführen.

Neben dieser physikalischen Einteilung der Schwingungen werden insbesondere in der Bauphysik die Schwingungen nach ihren Mechanismen unterteilt, was auch hier übernommen wird. Schwingungen in der mittleren Anströmungsrichtung werden durch den turbulenten Charakter des Windfeldes hervorgerufen und laufen regellos, d.h. stochastisch, ab. Gleichzeitig werden durch die Windturbulenz auch Schwingungen normal zur mittleren Anströmungsrichtung verursacht, die jedoch durch Schwingungen überlagert sind, die bei der Ausbildung einer Wirbelstraße auf periodische Wirbelablösungen im Lee eines angeströmten Körpers zurückzuführen sind. Dieser Mechanismus wird durch luvseitig gelegene Störkörper noch verstärkt, was in der Literatur häufig als 'buffeting' bezeichnet wird (Hirsch, 1979). Sehr dünnwandige, kreiszylindrische Schalenkonstruktionen können außerdem durch die periodischen Wirbelablösungen zu querschnittsverformenden Schwingungen angeregt werden ('ovalling') (Scruton, 1965).

Neben diesen erzwungenen Schwingungen treten noch selbsterregte Schwingungen auf. Bei diesen Schwingungen handelt es sich um bewegungsinduzierte Vorgänge mit stetig anwachsenden Amplituden. Hierzu sind die Galoppschwingungen ('galloping') zu zählen, die bei schlanken Körpern oberhalb einer kritischen Windgeschwindigkeit auftreten. Außerdem treten solche Schwingungen aufgrund von Interferenzeffekten auch bei engstehenden

Körpern, wie z.B. bei in einer Reihe stehenden Kaminen auf (Hirsch, 1979). Flatterschwingungen quer zur Anströmungsrichtung können als Koppelschwingungen von Biege- und Torsionsschwingungen bei schlanken, flächenartigen Körpern durch den Wind verursacht werden (Hirtz, 1981).

Da hier nur Biegeschwingungen von Bäumen analysiert werden sollen, werden Flatterschwingungen nicht behandelt. Weiterhin werden Interferenzerscheinungen, die das Schwingungsverhalten der Bäume im Bestand beeinflussen, nicht berücksichtigt, so daß Schwingungen, die auf 'buffeting' zurückzuführen sind, und 'galloping' nicht diskutiert werden. Die Vernachlässigung der Interferenzeffekte scheint gerade für Bäume im Bestand nicht vertretbar, muß aber hier in Kauf genommen werden, da mit den vorhandenen Meßsystemen solche Erscheinungen nicht erfaßt werden konnten. Zur Berücksichtigung von 'ovalling'-Erscheinungen, mit denen z.B. die Veränderung der Baumkrone als Funktion der Windgeschwindigkeit assoziiert werden kann, wird auf die Aussagen verwiesen, die im Abschnitt 4.3 über die Kronen von Nadelbäumen gemacht wurden.

## 5.2 Spektralmethode

Die Spektralmethode ermöglicht die Ermittlung der Reaktion eines Körpers im Frequenzbereich. In Abb. 16 ist der Rechenvorgang schematisch dargestellt. Ausgehend von der spektralen Verteilung  $P_u(f)$  der Windgeschwindigkeit ist es möglich, mit

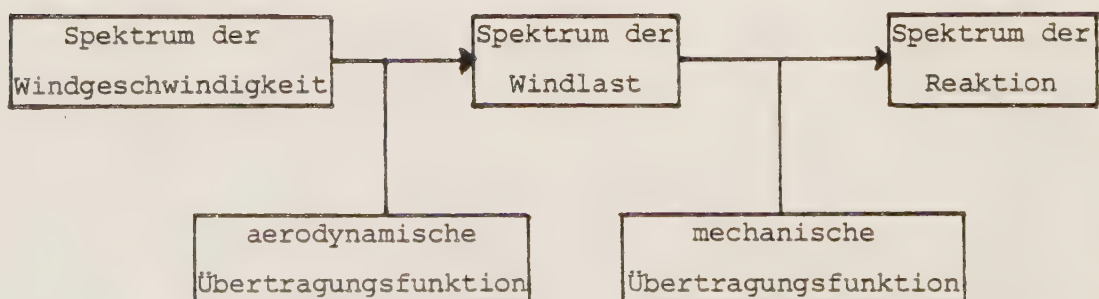


Abb. 16: Schema der Spektralmethode

dem Spektrum der aerodynamischen Übertragungsfunktion  $H_a(\bar{f})$  das Windlastspektrum  $P_F(f)$  zu berechnen. Die spektrale Verteilung  $P_Y(f)$  der Reaktion des Körpers erhält man aus  $P_F(f)$  über das Spektrum der mechanischen Übertragungsfunktion  $H_m(if)$ . Bei einem linearen System mit konstanten Parametern wird dieser Zusammenhang durch Gl. (59) beschrieben (Scherer, 1984):

$$P_Y(f) = |H_m(if)|^2 \cdot P_F(f) \quad (59)$$

Wegen der Linearität des Systems beeinflussen sich die Frequenzanteile unterschiedlicher Frequenzen gegenseitig nicht (Scherer, 1984). Nach geeigneter Transformation in ein Orthogonalsystem sind außerdem wegen der Konstanz der Systemparameter alle Eigenfrequenzen entkoppelt und insbesondere von der Zeit unabhängig (Bendat und Piersol, 1966). Dies bedeutet, daß  $H_m(if)$  nur von der Frequenz abhängt und keine Funktion der Erregung und der Zeit ist, was bei einem nichtlinearen System mit variablen Parametern der Fall wäre.

### 5.3 Belastung in der mittleren Windrichtung

Die instationäre Kraft  $F(t)$ , die auf einen schwingenden Körper von einer horizontalen Strömung mit veränderlicher Geschwindigkeit  $u$  ausgeübt wird, ergibt sich nach Gl. (60) zu (u.a. Davenport, 1961; Schueller und Panggabean, 1975; Panggabean, 1978):

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot |\tilde{u}| \cdot \tilde{u} \cdot A + \rho_1 \cdot c_m \cdot \frac{du}{dt} \cdot A \cdot \frac{q}{d} \quad (60)$$

Darin bedeuten  $\rho_1$  die Luftdichte,  $c_d$  den Widerstandsbeiwert,  $\tilde{u}$  die relative Windgeschwindigkeit, die auf den schwingenden Körper wirkt,  $A$  die Projektionsfläche des Körpers senkrecht zur Anströmungsrichtung,  $c_m$  den Massen- oder Trägheitsbeiwert,  $d$  den Durchmesser des Körpers und  $q$  die horizontale Querschnittsfläche des Körpers, für die bei einem Zylinder gilt:  $q = \pi(d/2)^2$ . Der erste Term auf der rechten Seite der Gl. (60) beschreibt den Widerstandsanteil der wirkenden Windkraft und

der zweite Term ihren Massenträgheitsanteil, der den Einfluß der Strömungsbeschleunigung auf die Windkraft berücksichtigt. Die relative Windgeschwindigkeit  $\tilde{u}$  setzt sich aus der tatsächlichen Windgeschwindigkeit  $u$  und der Schwingungsgeschwindigkeit  $\dot{Y} = \frac{dY}{dt}$  des Körpers zusammen, wobei mit  $Y$  die Auslenkung des Körpers in der Höhe  $z$  bezeichnet wird:

$$\tilde{u} = \bar{u} + u' - \dot{Y} \quad (61)$$

In Gl. (61) wurde dabei die Windgeschwindigkeit  $u$  in ihren zeitlichen Mittelwert  $\bar{u}$  und einen Schwankungsanteil  $u'$  zerlegt. Das Produkt  $|\tilde{u}| \cdot \tilde{u}$  in Gl. (60) besagt, daß bei einem schwingenden Körper im allgemeinen  $\tilde{u}$  nicht zu allen Zeiten positiv ist, was aber häufig zur Vereinfachung angenommen wird (Finnigan und Mulhearn, 1978). Mit dieser Annahme und Gl. (61) ergibt sich unter Vernachlässigung der Glieder proportional zu  $u'^2$ ,  $\dot{Y}^2$ ,  $u' \dot{Y}$  und  $\ddot{Y}$  aus Gl. (60):

$$\begin{aligned} F(t) = & \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot A \cdot \bar{u}^2 + \rho_1 \cdot c_d \cdot A \cdot \bar{u} \cdot u' + \rho_1 \cdot c_m \cdot A \cdot \frac{g}{d} \cdot \frac{du'}{dt} \\ & - \rho_1 \cdot c_d \cdot A \cdot \frac{g}{d} \cdot \bar{u} \cdot \dot{Y} \end{aligned} \quad (62)$$

Der letzte Ausdruck auf der rechten Seite der Gl. (62) wird als aerodynamische Dämpfung bezeichnet und in der Regel zu dem Dämpfungsglied auf der linken Seite der Schwingungsgleichung (Gl. 27) addiert. Somit setzt sich die gesamte, wirkende Windkraft  $F(t) = \bar{F} + F'(t)$  aus einem statischen Anteil  $\bar{F}$ , der die mittlere Reaktion des Körpers verursacht,

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot A \cdot \bar{u}^2 \quad (63)$$

und einem dynamischen Anteil  $F'(t)$

$$F'(t) = \rho_1 \cdot A \cdot (c_d \cdot \bar{u} \cdot u'(t) + c_m \cdot \frac{g}{d} \cdot \frac{du'(t)}{dt}) \quad (64)$$

zusammen, durch den die dynamischen Reaktionen des Körpers hervorgerufen werden.

Das Spektrum  $P_F(f)$  der Windkräfte kann aus Gl. (64) über die Bildung der Korrelationsfunktion und anschließender Fouriertransformation ermittelt werden. Nach einigen Umformungen ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen  $P_F(f)$  und dem longitudinalen Windspektrum  $P_{u_1}(f)$  (Booz und Schueller, 1982):

$$P_F(f) = \rho_l^2 \cdot c_d^2 \cdot A^2 \cdot \overline{u_1}^2 \cdot H_a^2(f) \cdot P_{u_1}(f) \quad (65)$$

Die Bezeichnungen in Gl. (65) entsprechen denen in Gl. (60), wobei mit  $H_a(f)$  die aerodynamische Übertragungsfunktion abgekürzt ist. Sie stellt den Übergang von den Windgeschwindigkeitsschwankungen zur fluktuierenden Kraft dar. Da  $H_a(f)$  u.a. auch von der aerodynamischen Form des angeströmten Körpers abhängt, wird sie oft auf eine vertikale Längeneinheit  $\Delta z$  bezogen. Bei einem geraden Kreiszylinder mit dem Durchmesser  $d$  läßt sich  $H_a^2(f)$  durch Gl. (66) theoretisch beschreiben (Pangabeau, 1978):

$$H_a^2(f) = 1 + \frac{1}{4} \cdot \pi^4 \cdot \left( \frac{f \cdot d}{\overline{u}} \right)^2 \cdot \left( \frac{c_m}{c_d} \right)^2 \quad (66)$$

Versuche haben jedoch gezeigt (u.a. Surry, 1972; Vickery und Kao, 1972), daß in der Realität deutliche Abweichungen von dieser theoretischen Beziehung auftreten, die unter der Annahme eines konstanten Widerstands- und Trägheitsbeiwertes abgeleitet wurde. Unter Vernachlässigung der Strömungsbeschleunigung in Gl. (60) stellten Vickery und Kao (1972) folgende empirische Gleichung für  $H_a^2(f)$  auf, die den tatsächlichen Verlauf besser als die Gl. (66) beschreiben sollte:

$$H_a^2(f) = \left( 1 + \left( \frac{2 \cdot f \cdot \sqrt{A}}{\overline{u}} \right)^{\frac{4}{3}} \right)^{-2} \quad (67)$$

Für einen Kreiszylinder mit einem Durchmesser  $d=0.5$  m enthält Abb. 17 die aerodynamischen Übertragungsfunktionen, die bei einer mittleren Windgeschwindigkeit  $\overline{u}=10.0$  m/s nach Gl. (66) und Gl. (67) berechnet wurden. Es zeigt sich, daß  $H_a^2(f)$  bei niedrigen Frequenzen immer den Wert 1.0 besitzt. Da die Eigenfrequenzen von Türmen in fast allen Fällen in diesem Frequenz-

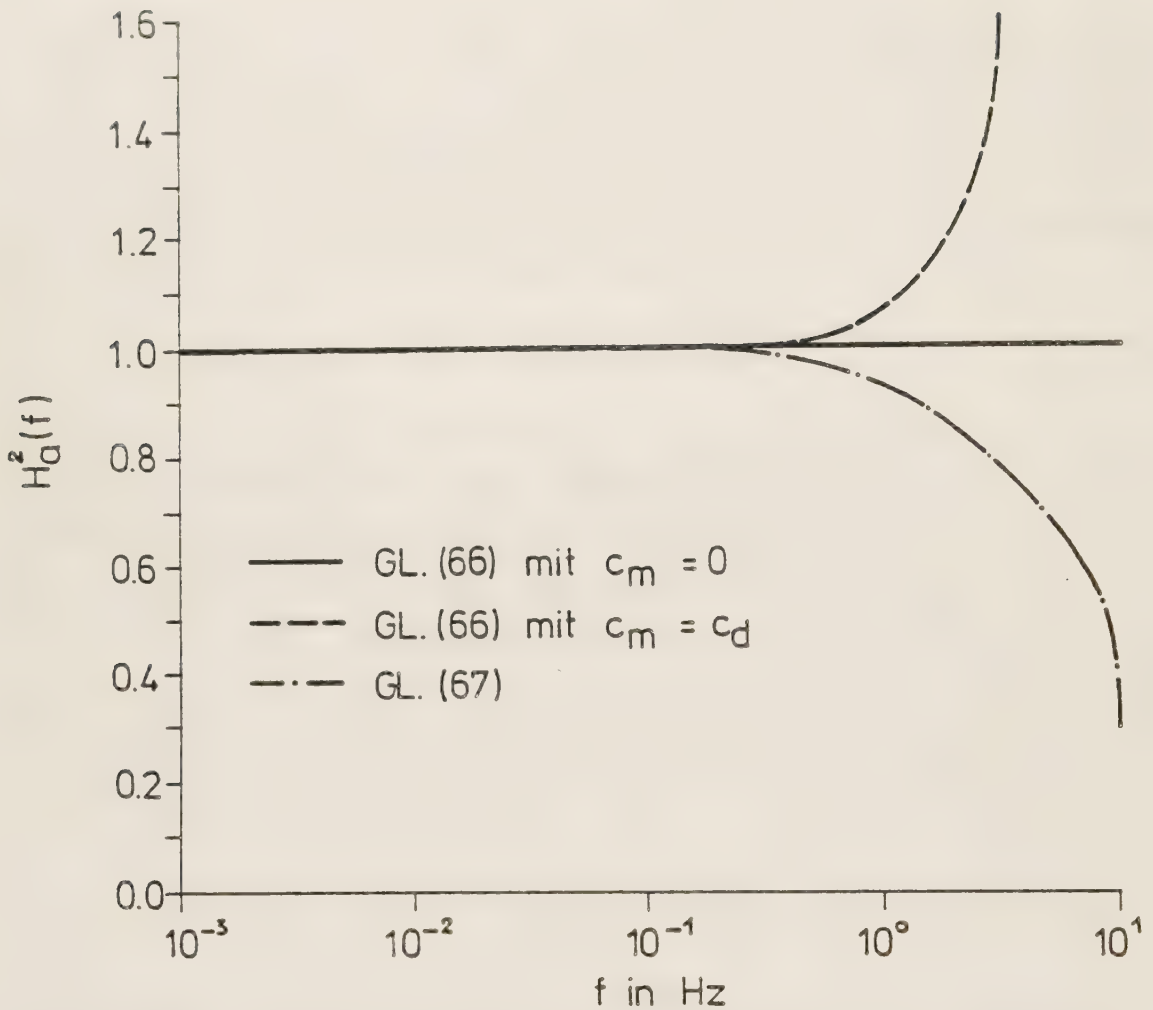


Abb. 17: Qualitativer Verlauf des Quadrates der aerodynamischen Übertragungsfunktion  $H_a(f)$  nach verschiedenen Angaben für einen Kreiszylinder bei einer mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u} = 10.0$  m/s

bereich liegen, wird in der Bauphysik die aerodynamische Übertragungsfunktion im allgemeinen für alle Frequenzen gleich 1.0 gesetzt (Panggabean, 1978). Dies entspricht nach einer Interpretation von  $H_a(f)$  von Reichmann (1984) einem frequenzunabhängigen Widerstandsbeiwert  $c_d$ . Außerdem folgt aus  $H_a(f) = 1.0$ , daß, wegen  $c_m = 0$ , die Strömungsbeschleunigung vernachlässigt wird. Aufgrund der Ähnlichkeit von schwingenden Nadelbäumen mit turmartigen Tragwerken wird die aerodynamische Übertragungsfunktion bei den für Baumschwingungen relevanten Frequenzen ebenfalls gleich 1.0 gesetzt.

Um Aussagen über die Reaktion eines Baumes unter Windbelastung machen zu können, benötigt man bei der hier angewendeten Methodik den Verlauf der mechanischen Übertragungsfunktion  $H_m(if)$ . Bei einem linearen System besitzt  $H_m(if)$  für den eingeschwungenen Zustand und kleine Dämpfung schmale Frequenzbänder, d.h. das System wirkt wie ein Schmalbandfilter, das nur die Erregungsenergie im Bereich der Eigenfrequenzen überträgt (Schueller et al., 1975). Somit kann  $|H_m(if)|$  im eingeschwungenen Zustand aus dem Schwingungssystem selbst ermittelt werden, was im folgenden am Beispiel eines linearen Systems mit konstanten Koeffizienten durchgeführt wird.

Der Betrag der mechanischen Übertragungsfunktion, die im allgemeinen eine komplexe Größe ist, ergibt sich aus der Lösung der Gl. (27) für erzwungene Schwingungen. Macht man für die äußere Kraft  $F(t)$  einen periodischen Ansatz der Form

$$F(t) = F_0 \cdot \exp(i2\pi ft) \quad (68)$$

so zeigt sich, das die Auslenkung  $Y$  nach Ablauf der Einschwingzeit ebenfalls eine periodische Zeitfunktion mit der Frequenz  $f$  wird, allerdings mit einer Phasenverschiebung  $\phi$  gegen die äußere Kraft  $F(t)$  (Gerthsen et al., 1974):

$$Y(t) = Y_0 \cdot \exp(i \cdot (2\pi ft - \phi)) \quad (69)$$

Setzt man Gl. (68) und Gl. (69) in Gl. (27) ein, dann erhält man:

$$-(2\pi f)^2 \cdot m + i2\pi f \cdot D + k_s = \frac{F_0}{Y_0} \cdot \exp(i\phi) \quad (70)$$

Mit der Frequenz der ungedämpften Grundschiwingung  $f_r$  nach Gl. (31) ergibt sich für das Amplitudenverhältnis  $Y_0/F_0$ :

$$\left| \frac{Y_0}{F_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{16 \cdot \pi^4 \cdot m^2 \cdot (f_r^2 - f^2)^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot f^2}} \quad (71)$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite von Gl. (71) stellt den Be-

trag der mechanischen Übertragungsfunktion dar, die mit dem dimensionslosen Dämpfungsverhältnis  $\Delta$

$$\Delta = \frac{D}{2 \cdot \sqrt{k_s \cdot m}} \quad (72)$$

die folgende Form erhält (Bendat und Piersol, 1966):

$$\left| H_m(if) \right| = \frac{1/k_s}{\sqrt{(1 - (f/f_r)^2)^2 + (2 \cdot \Delta \cdot f/f_r)^2}} \quad (73)$$

Die zugehörige Phasenverschiebung  $\phi$  zwischen der erzwungenen Schwingung und der äußeren Erregerkraft ergibt sich aus Gl. (74):

$$\tan \phi = \frac{2 \cdot \Delta \cdot f/f_r}{1 - (f/f_r)^2} \quad (74)$$

Die bei dieser Ableitung gemachte Annahme einer viskosen, geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung ist mathematisch bequem aber in der Praxis unzureichend, da viele reale Dämpfungsarten davon abweichen. In dem vorliegenden Fall eines schwingenden Baumes in einer Strömung tritt eine zusätzliche Dämpfung auf, die nach Gl. (62) als aerodynamische Dämpfung bezeichnet wird.

Die gesamte Dämpfung eines Baumes kann z.B. experimentell mit Gl. (34) über ein effektives logarithmisches Dekrement  $\delta_e T$  bestimmt werden, wobei sich die effektive Abklingkonstante  $\delta_e$  aus einem strukturspezifischen Anteil  $\delta_s$  und einem aerodynamischen  $\delta_{ae}$  zusammensetzt:

$$\delta_e = \delta_s + \delta_{ae} \quad (75)$$

Während die Strukturdämpfung sowohl frequenz- als auch richtungsunabhängig ist, ist die aerodynamische Dämpfung von der Frequenz und der Strömungsrichtung abhängig. Bei einem schwingendem Kreiszylinder genügt das aerodynamische logarithmische Dekrement  $\delta_{ae} T$  bei paralleler Bewegungs- und Strömungsrichtung der folgenden Beziehung (Reichmann, 1984):

$$\delta_{ae}^T = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot \frac{\bar{u}}{d \cdot f_r \cdot m} \quad (76)$$

Die Bezeichnungen in Gl. (76) entsprechen denen in Gl. (60), wobei  $m$  die Körpermasse und  $f_r$  die ungedämpfte Grundschwingungsfrequenz des Körpers bedeuten. Bei einer Schwingung senkrecht zur Strömungsrichtung beträgt die aerodynamische Dämpfung für einen Kreiszylinder nur die Hälfte des Dämpfungswertes in Strömungsrichtung (Reichmann, 1984).

#### 5.4 Belastung quer zur mittleren Windrichtung

Neben der Anregung in der mittleren Strömungsrichtung wird ein Körper auch senkrecht dazu zu Schwingungen angeregt, so daß er insgesamt beliebige elliptische Auslenkungen ausführt. Als dominierende Ursachen für diese Quertriebskräfte werden in der Bauphysik Wirbelablösungseffekte und laterale Windturbulenz angegeben (z.B. Schueller, 1979; Reichmann, 1984). Die instantonäre Quertriebskraft  $Q(t)$  wird als Funktion des Staudruckes für einen Kreiszylinder wie folgt definiert (Panggabean, 1978):

$$Q(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_q(t) \cdot u^2(t) \cdot d \quad (77)$$

Die Größen in dieser Gleichung besitzen die gleiche Bedeutung wie in Gl. (60), wobei  $c_q(t)$  den veränderlichen Quertriebsbeiwert bezeichnet. Neben dieser Zeitabhängigkeit besitzt der Quertriebsbeiwert auch eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl, mit der man die aerodynamischen Vorgänge an umströmten Körpern einteilen kann. Im Fall des umströmten Kreiszylinders wird die Reynoldszahl  $Re$  mit folgender Gleichung bestimmt:

$$Re = \frac{d \cdot \bar{u}}{\nu} = \frac{\rho \cdot d \cdot \bar{u}}{\mu} \quad (78)$$

Darin bedeuten  $d$  den Zylinderdurchmesser als charakteristische Körperdimension,  $\bar{u}$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $\nu$  die kinematische,  $\mu$  die dynamische Zähigkeit und  $\rho$  die Dichte des strömenden Mediums.

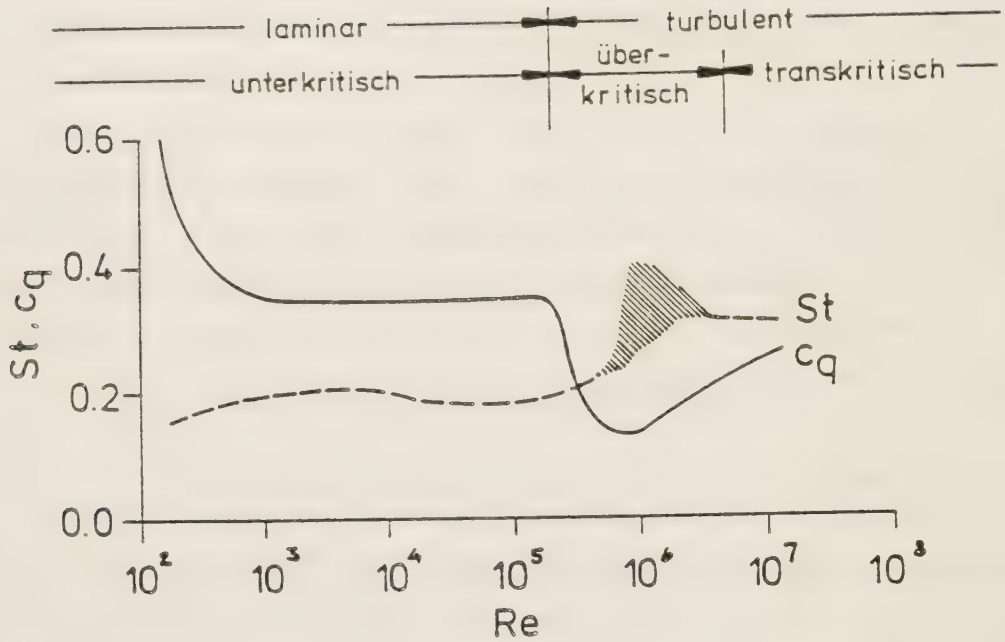


Abb. 18: Abhängigkeit der Strouhalzahl  $St$  und des Quertriebsbeiwertes  $c_q$  eines quer angeströmten Kreiszylinders von der Reynoldszahl  $Re$  (nach Försching, 1974)

Aus Abb. 18 ist die Einteilung der Strömung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$  zu entnehmen. Im unterkritischen Bereich, der sich bis  $Re \approx 2 \cdot 10^5$  erstreckt, bleibt die Strömung laminar, dann wird sie im über- und transkritischen Reynoldsbereich turbulent. Im unterkritischen Bereich lösen sich im Lee des angeströmten Zylinders periodisch Wirbel ab, die sich zu einer stabilen Wirbelstraße ausbilden (v. Kármán und Rubach, 1912). Schon Strouhal (1878) wies auf eine gewisse Regelmäßigkeit in der Wirbelablösung von umströmten Körpern hin und definierte die Frequenz der Wirbelablösung wie folgt:

$$f_{\text{wir}} = St \cdot \frac{\bar{u}}{d} \quad (79)$$

Hierin bedeuten  $\bar{u}$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $d$  den Zylinderdurchmesser als charakteristische Körperdimension und  $St$  die dimensionslose Wirbelfrequenz, die auch Strouhalzahl genannt wird. Bei einem umströmten Zylinder besitzt die Strou-

halzahl im unterkritischen Bereich einen annähernd konstanten Wert  $St=0.20$  und im transkritischen Bereich ( $Re \approx 3 \cdot 10^6$ ) einen mittleren Wert um  $St=0.25$  (Försching, 1974; Schueller, 1979).

Wie schon durch die nahezu konstante Strouhalzahl im transkritischen Bereich angezeigt wird, nehmen auch hier die Wirbelablösungen einen näherungsweise periodischen Charakter an, so daß sich eine quasi-periodische Wirbelstraße ausbilden kann. Im überkritischen Bereich ( $2 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$ ), der den Beginn der turbulenten Strömung kennzeichnet, ist der Ablösevorgang in bezug auf Zeit und Raum stochastisch. In diesem Bereich ist die Strouhalzahl streng genommen nicht definiert, da die Wirbelablösung nicht mehr periodisch ist. Wird hier trotzdem eine Strouhalzahl berechnet, so zeigt sich in den Werten eine große Streuung, die in Abb. 18 durch die Schraffur angedeutet ist.

Auf weitere Abhängigkeiten der Strouhalzahl, wie z.B. von der Strömungsgeschwindigkeit oder dem Profil des angeströmten Körpers, wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Aussagen hierzu sind der Literatur, u.a. Truckenbrodt (1968), zu entnehmen.

Der Verlauf des Quertriebsbeiwertes  $c_q$  als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  ist qualitativ in Abb. 18 dargestellt. In Ergänzung dazu enthält Abb. 19 für einen Kreiszylinder bei  $Re \approx 10^5$  den Verlauf von  $c_q$  in Abhängigkeit von der Strouhalzahl  $St$ . Dieser Zusammenhang ist für den gesamten unterkritischen Bereich zwischen  $1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$  charakteristisch (Försching, 1974). Man kann aus Abb. 19 weiterhin erkennen, daß die Windbelastung nur im Bereich  $0.10 < St < 0.25$  schwingungsanregend wirkt. Außerhalb dieses Bereiches ist der Quertriebsbeiwert negativ, d.h. die Quertriebskräfte wirken auf das schwingende System dämpfend. Entsprechende Messungen der Quertriebsbeiwerte des Kreisprofils von Cincotta et al. (1969) lieferten für den transkritischen Bereich prinzipiell dieselben Zusammenhänge wie im unterkritischen Bereich. Sie fanden jedoch auch einige bemerkenswerte Unterschiede zwischen den beiden Bereichen,

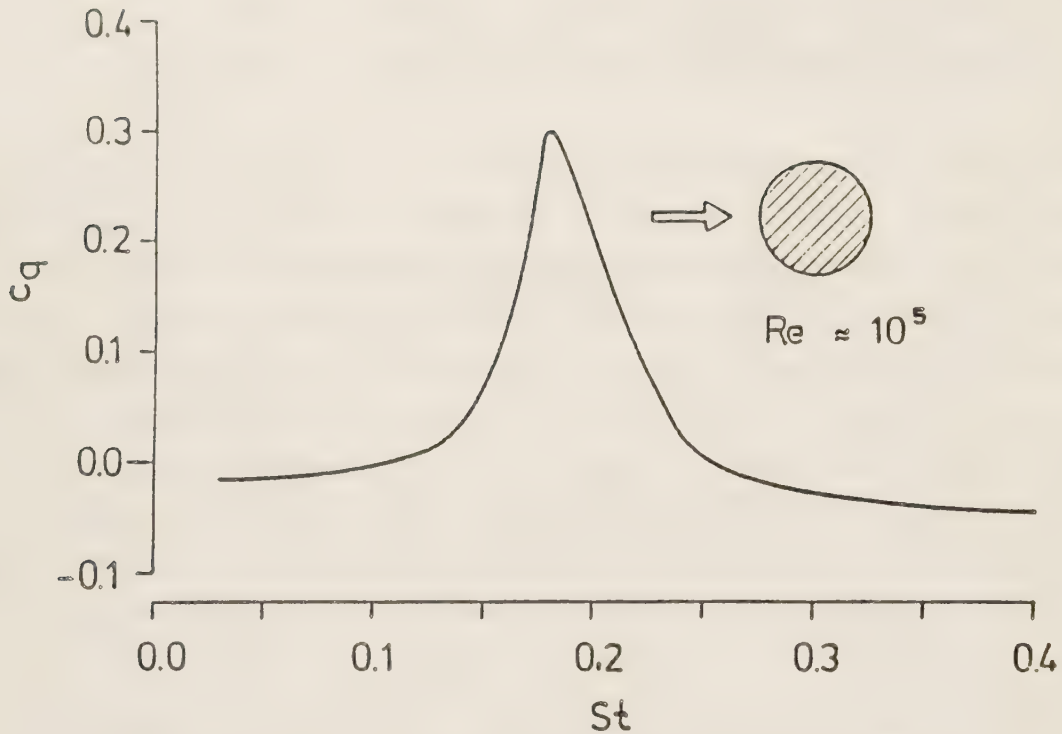


Abb. 19: Experimentell bestimmte Quertriebsbeiwerte  $c_q$  eines Kreiszylinders als Funktion der Strouhalzahl  $St$  (nach Försching, 1974)

wie z.B. die Zunahme der Quertriebsbeiwerte mit zunehmender Schwingungsamplitude im transkritischen Bereich. Darauf soll hier allerdings nicht näher eingegangen werden.

Hinsichtlich des Schwingungsverhaltens eines Körpers ist es primär von Interesse, ob die in Gl. (79) definierte Frequenz der Wirbelablösung mit einer der Eigenfrequenzen des Körpers übereinstimmt, da dann Resonanzschwingungen auftreten. Aus Gl. (79) kann eine kritische Windgeschwindigkeit  $u_{kr}$  ermittelt werden, bei der die Anzahl der pro Zeiteinheit sich ablösenden Wirbel der Frequenz  $f_n$  entsprechen:

$$u_{kr} = \frac{1}{St} \cdot d \cdot f_n \quad (80)$$

In Gl. (80) bedeutet  $f_n$  je nach Problemstellung eine der Eigenfrequenzen des Körpers, wobei bei Bäumen der Grundswin-

gungsfrequenz  $f_1$  die größte Bedeutung zukommt.

Für Baumkronen, die einen charakteristischen Kronendurchmesser von 5 m besitzen, liegen unter atmosphärischen Grenzschichtbedingungen die Reynoldszahlen überwiegend im über- und transkritischen Bereich. In diesen Bereichen weisen die Quertriebskräfte eine große Bandbreite auf, so daß durch eine spektrale Formulierung und eine stochastische Berechnung der Reaktion die realen Verhältnisse besser beschrieben werden können. Unter der Voraussetzung einer konstanten Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  läßt sich aus Gl. (77) analog zu Gl. (65) eine Beziehung zwischen Quertriebsspektrum  $P_{Q_1}(f)$  und dem Quertriebsbeiwertspektrum  $P_{C_q}(f)$  ableiten:

$$P_{Q_1}(f) = \frac{1}{4} \cdot \rho_1^2 \cdot \bar{u}^4 \cdot d^2 \cdot P_{C_q}(f) \quad (81)$$

Die Bezeichnungen in dieser Gleichung entsprechen denen in Gl. (60). Zur Beschreibung der spektralen Verteilung des Quertriebsbeiwertes  $c_q$  werden in der Bauphysik häufig empirische Spektren verwendet, von denen im überkritischen Bereich das Spektrum von Fung (1960) eine gewisse Verbreitung gefunden hat:

$$P_{C_q}^*(St) = 2 \cdot C_F \cdot \frac{1 + 3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot C_F \cdot St)^2}{(1 + (2 \cdot \pi \cdot C_F \cdot St)^2)^2} \quad (82)$$

In Gl. (82) bedeuten  $St$  die Strouhalzahl und  $C_F$  eine Konstante, für die in der Regel der Wert  $C_F=2.4$  verwendet wird (Fung, 1960; Panggabean und Reichmann, 1977; Reichmann, 1984).  $P_{C_q}^*(St)$  ist das normierte Quertriebsspektrum als Funktion der Strouhalzahl, das mit  $P_{C_q}(f)$  wie folgt zusammenhängt (Reichmann, 1984):

$$P_{C_q}(f) = \frac{d}{\bar{u}} \cdot \sigma_{C_q}^2 \cdot P_{C_q}^*(St) \quad (83)$$

Hierin bedeuten  $d$  eine charakteristische Körperdimension, bei einem Zylinder z.B. dessen Durchmesser,  $\bar{u}$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und  $\sigma_{C_q}^2$  die Varianz des Quertriebsbeiwertes.

tes. Für einen oszillierenden Zylinder gibt Fung (1960) einen Mittelwert  $\overline{c_q} = 0.00$ , eine Varianz  $\sigma_{c_q}^2$  zwischen 0.0225 und 0.0256 sowie einen Maximalwert  $c_q^{\max}$  zwischen 0.30 und 0.40 an.

Bei der Berechnung der Reaktionen von stehenden Stahlbetonkaminen wendete Nakagawa (1965) das Spektrum von Fung (1960) an und fand eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen und seinen gemessenen Werten bis zu  $Re \approx 1 \cdot 10^7$ , was im transkritischen Bereich liegt. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit dieses Spektrum auch im transkritischen Bereich verwendet.

Eine weitere Möglichkeit das Quertriebsbeiwertspektrum zu parametrisieren, stammt von Vickery und Clark (1972), die den Spektren ihrer Meßdaten die folgende Beziehung anpaßten:

$$f \cdot P_{c_q}(f) = \sigma_{c_q}^2 \cdot \frac{f}{C_v \cdot f^{\max}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{1 - f/f^{\max}}{C_v}\right)^2\right) \quad (84)$$

In Gl. (84) wird mit  $f^{\max}$  die Frequenz bezeichnet, bei der  $P_{c_q}(f)$  ein Maximum besitzt, und durch  $C_v$  ein dimensionsloser Streuungsparameter, der vom über- zum transkritischen Bereich von 0.80 auf 1.00 zunimmt (Reichmann, 1984).

Mit Gl. (84), wie auch mit der Beziehung von Fung (1960), ist es aber nur möglich, den Einfluß der Wirbelablösung zu berücksichtigen, nicht aber den der lateralen Turbulenz. Hierzu ist eine Formulierung der durch die laterale Turbulenz hervorgerufenen Quertriebskraft  $Q_2(t)$  notwendig, um die gesamte, wirkende Quertriebskraft zu ermitteln.

In einem horizontalen Koordinatensystem mit  $\overline{u_2} = 0.0$  m/s ist die fluktuierende horizontale Windgeschwindigkeit  $u_h(t)$  gegeben durch:

$$u_h(t) = \overline{u_1} + u_1'(t) + u_2'(t) \quad (85)$$

Nach Cooper und Surry (1975) beträgt der durch die laterale

Turbulenz, die die Schwankungen der Windrichtung beschreibt, bedingte Belastungsanteil  $Q_2(t)$ :

$$Q_2(t) = \frac{u'_1(t)}{u_h(t)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot u_h(t) \quad (86)$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $\rho_1$  die Luftdichte und  $c_d$  den Widerstandsbeiwert. Setzt man nun Gl. (85) in Gl. (86) ein, und vernachlässigt die Terme mit  $u'_1(t)/\overline{u_1}$  und  $u'_2(t)/\overline{u_1}$  wegen  $u'_1 \ll \overline{u_1}$  und  $u'_2 \ll \overline{u_1}$ , so erhält man näherungsweise:

$$Q_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot c_d \cdot \overline{u_1} \cdot u'_2(t) \quad (87)$$

Das Spektrum  $P_{Q_2}(f)$  der Belastung  $Q_2(t)$  ergibt sich dann aus Gl. (87) zu (Cooper und Surry, 1975):

$$P_{Q_2}(f) = \frac{1}{4} \cdot \rho_1^2 \cdot c_d^2 \cdot \overline{u_1}^2 \cdot P_{u_2}(f) \quad (88)$$

$P_{u_2}(f)$  ist hier das laterale Windspektrum, das z.B. mit Gl. (49) beschrieben werden kann.

Da sich bei einem linearen System die Gesamtbelastung als Summe der Einzelbelastungen ergibt, gilt für das Spektrum der gesamten lateralen Belastung  $P_Q(f)$  (Panggabean und Reichmann, 1977):

$$P_Q(f) = P_{Q_1}(f) + P_{Q_2}(f) \quad (89)$$

## 6 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen über windinduzierte Baumschwingungen wurden auf drei verschiedenen Versuchsflächen in der Nähe Münchens im Ebersberger und Hofoldinger Forst sowie im Forstenrieder Park durchgeführt. Die Nähe zu München war notwendig, da aufgrund der Problemstellung größtenteils während Starkwind- und Sturmlagen gemessen werden mußte und jeweils kurz zuvor die gesamte Meßapparatur aufzubauen war.

### 6.1 Versuchsflächen

Auf der meteorologischen Versuchsfläche im Ebersberger Forst wurde das Schwingungsverhalten zweier Fichten in einem Hochwald untersucht. Diese Meßfläche liegt etwa 20 km südöstlich von München, ca. 700 m vom westlichen Bestandsrand entfernt, innerhalb eines homogenen, 92-jährigen Fichtenhochwaldes. Der Ebersberger Forst ist das größte geschlossene Waldgebiet in Mitteleuropa mit einer Fläche von 7700 ha (Hager, 1975). Der Bestand stockt auf einer typischen Parabraunerde der Münchner Schotterebene (v. Droste zu Hülshoff, 1969).

Im Herbst 1984 wurden auf der meteorologischen Meßfläche einige ertragskundliche Bestandskenngrößen aufgenommen. Es ergab sich eine Bestandsdichte von 492 Stämmen/ha, eine Bestandsoberhöhe von 34.0 m und eine Bestandsmittelhöhe von 31.8 m. Die mittlere Kronenansatzhöhe lag 22.3 m über dem Waldboden.

Aufgrund der vorhandenen Meßeinrichtungen, die auch bei den hier durchgeführten Messungen benutzt wurden, ist diese Versuchsfläche hervorragend für experimentelle Untersuchungen geeignet. Im Rahmen des Internationalen Biologischen Programms (IBP) waren im Jahr 1966 auf der Meßfläche zwei Stahlrohrtürme und eine mit einem elektrischen Stromanschluß versehene Registrierhütte errichtet worden. Diese beiden Türme sind 29 m voneinander entfernt und 33 m bzw. 40 m hoch. Weitere Einzelheiten können u.a. den Beschreibungen von Tajchman (1967) und

Klemmer (1969) entnommen werden.

Auf den beiden Versuchsflächen im Hofoldinger Forst und im Forstenrieder Park hingegen waren keine Meßeinrichtungen vorhanden. Für die Windmessungen wurde deshalb ein tragbarer Teleskopmast der Firma Köttgen verwendet, an dem die Meßgeräte befestigt wurden. Im ausgefahrenen Zustand hatte dieser Mast eine Höhe von 15 m. Im Forstenrieder Park wurde er auf einer durch Windwurf verursachten Lichtung aufgestellt, die nach Westen hin offen war. Am östlichen Rand dieser Lichtung stockten die ausgewählten Versuchsfichten, die im Verlauf der Untersuchungen alle bis auf zwei Ausnahmen durch Windeinwirkungen geworfen wurden. Die Meßfläche im Hofoldinger Forst liegt nahe der Bundesautobahn München - Salzburg. Durch die Autobahntrasse wurde das Bestandsgefüge so geschwächt, daß auch hier jedes Jahr mit erheblichen Windwurfschäden gerechnet werden muß. Aufgrund der Nähe der Autobahn kann zusätzlich davon ausgegangen werden, daß die ausgewählte Kiefer und Fichte durch die starke Immisionsbelastung geschädigt sind.

Der Boden besteht auf beiden Versuchsflächen aus Lehm oder Braunerde über Schotter. Von einer Charakterisierung der Bestände auf diesen Meßflächen wird hier abgesehen, da alle Versuchsbäume durch die vorangegangenen Windwürfe teilweise freigestellt wurden, so daß ihr Schwingungsverhalten nicht mehr von Bestandsparametern, sondern nur noch von ihren baumspezifischen Kenngrößen geprägt ist.

## 6.2 Meßsysteme

Zur Berechnung der dynamischen Windbelastung von Bäumen ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes der auf einen Baum einwirkenden Windströmung notwendig. Um das Verhalten des Baumes in dieser Strömung ausreichend gut beurteilen zu können, muß der Wind als dreidimensionale, vektorielle Größe erfaßt werden. Gleichzeitig müssen die Reaktionen des Baumes über geeignete Aufnehmer gemessen werden.

### 6.2.1 Windmeßgeräte

Für die Windmessungen wurden drei 'Gill Anemometer Bivane' (Modell 21003) der Firma Young eingesetzt. Im Ebersberger Forst wurden in 34 m Höhe an jedem der beiden Türme jeweils eines der Meßgeräte befestigt. Dazu wurde der niedrigere Turm mit Hilfe eines Rohres um 1 m nach oben verlängert und der höhere Turm mit einem 2 m langen Ausleger auf der den Versuchsbäumen zugewandten Seite versehen, um die Turmeinflüsse möglichst gering zu halten. Das dritte Windmeßgerät wurde ebenfalls an einem Ausleger ca. 2 m vom niedrigeren Turm entfernt in 24 m Höhe angebracht.

Während der Messungen im Hofoldinger Forst und im Forstenrieder Park waren die Windmeßgeräte in 15 m Höhe an der Mastspitze, sowie in 7.5 m und 3.7 m Höhe an zwei jeweils 1.5 m langen Auslegern befestigt. Aus Stabilitätsgründen waren die beiden Ausleger auf gegenüberliegenden Seiten des Mastes angebracht. Bei den Untersuchungen im Forstenrieder Park waren dies die Nord- und die Südseite, da die vorherrschende Windrichtung auf der Meßfläche Westen ist (vgl. hierzu Abschnitt 6.1).

Die 'Gill Anemometer Bivane' ist eine doppelte Windfahne mit einem Propeller, dessen dynamisches Verhalten sehr sorgfältig auf das dynamische Verhalten der Windfahne abgestimmt ist (Young Co., 1978). Das Meßgerät liefert folgende Komponenten des dreidimensionalen Windvektors an einem Ort: Betrag  $|\vec{u}|$  des Windvektors, Azimutwinkel  $\alpha$  (= Windrichtung) und Elevationswinkel  $\epsilon$  (= Abweichung aus der Horizontalen). Der Windvektorbetrag ist im Bereich von 0.1 m/s bis 30.0 m/s proportional zu den Umdrehungen des Propellers pro Zeiteinheit. Wie aus Abb. 20 zu entnehmen ist, können Fahne und Propeller zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  frei um die vertikale Achse des Meßgerätes rotieren, während die Anzeige des Elevationswinkels nur in einem Bereich  $-50^\circ \leq \epsilon \leq +50^\circ$  aus der Horizontalen möglich ist. Die Änderungen des Azimut- und Elevationswinkels werden durch Potentiometer in elektrische Signale umgewandelt, wobei das

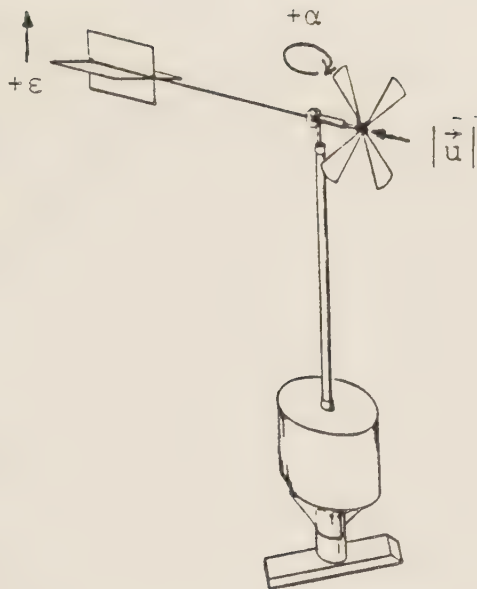


Abb. 20: Schematisierte Darstellung einer 'Gill Anemometer Bivane' der Firma Young;  $\epsilon$ : Elevationswinkel,  $\alpha$ : Azimutwinkel,  $|\vec{u}|$ : Windvektorbetrag (nach Amtmann, 1985)

Potentiometer für die Umwandlung der Azimutwinkel einen offenen Bereich von  $8^\circ$  besitzt. Dieser Bereich wurde bei den vorliegenden Untersuchungen nach Anregung des Herstellers nach Norden orientiert (Young Co., 1978).

Die dynamischen Eigenschaften von Propellern und Fahnen, sowie deren Kombinationen sind in der Literatur schon hinreichend

Tab. 6: Mittlere Kenngrößen einer 'Gill Anemometer Bivane' der Firma Young;  $L$ : charakteristische Länge des Propellers,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_n$ : Wellenlänge der gedämpften (ungedämpften) Grundschwingung einer Windfahne,  $\zeta$ : Dämpfungsverhältnis einer Windfahne,  $Dd$ : 'delay distance' einer Windfahne (nach Young Co., 1978)

| $L$<br>in m | $\lambda_d$<br>in m | $\lambda_n$<br>in m | $\zeta$ | $Dd$<br>in m |
|-------------|---------------------|---------------------|---------|--------------|
| 1.0         | 5.8                 | 4.5                 | 0.63    | 1.0          |

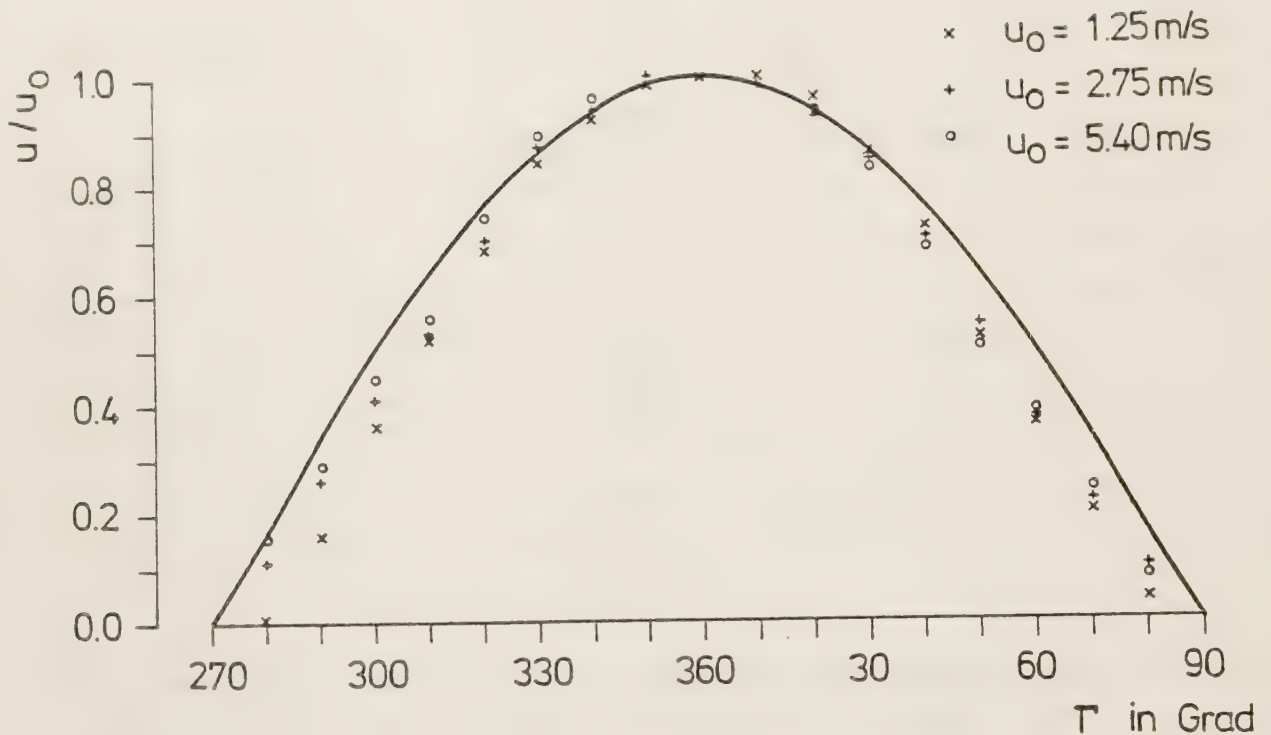


Abb. 21: Vergleich der von einem Propeller angezeigten Windgeschwindigkeiten mit einer idealen Kosinusform (durchgezogene Linie) für drei verschiedene Windgeschwindigkeiten;  $\Gamma$ : Anströmungswinkel

oft diskutiert worden (z.B. MacCready und Jex, 1964; Acheson, 1970; Wyngaard, 1981). In Tab. 6 sind die Gerätekonstanten der hier verwendeten 'Gill Anemometer Bivanes' zusammengestellt. Da diese Kenngrößen für alle verwendeten Geräte nahezu konstant sind - alle Abweichungen sind kleiner als 3 % der angegebenen Werte - werden sie exemplarisch nur für ein Gerät angegeben. Die Angaben in Tab. 6 beziehen sich auf die Kombination eines Propellers mit 23 cm Durchmesser und einer Doppelwindfahne mit jeweils einer quadratischen Fläche von 529 cm<sup>2</sup>.

Die Trägheit des Propellers kann durch seine charakteristische Länge  $L$  beschrieben werden. Diese Größe ist für Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s unabhängig von der Windgeschwindigkeit, jedoch abhängig vom Anströmungswinkel  $\Gamma$  (Fritschen und Gay, 1979). Für Propeller, wie sie auch hier verwendet wurden, nimmt  $L$  mit zunehmendem Winkel zwischen Propellerachse und An-

strömungsrichtung von 1 m auf 3 m zu (Garratt, 1975). Dies kennzeichnet die Abnahme der durch den Propeller erfaßten Geschwindigkeit mit zunehmendem Anströmungswinkel. Diese Abhängigkeit ist in Abb. 21 für einen der verwendeten Propeller exemplarisch dargestellt. Idealerweise ist das Verhältnis  $u/u_0$  proportional zu  $\cos\Gamma$  (z.B. Hicks, 1972). Aus Abb. 21 läßt sich jedoch entnehmen, daß mit zunehmendem Anströmungswinkel  $\Gamma$  immer größere Abweichungen des gemessenen Verhaltens vom theoretisch zu erwartenden auftreten. Nur bei Anströmungswinkeln  $\Gamma < 30^\circ$  ist das theoretische Verhalten gut erfüllt. Da ein Propeller, der auf einer Windfahne montiert ist, kaum größeren Anströmungswinkeln ausgesetzt ist (Monna und Driedonks, 1979), wird für den Propeller ein Kosinusverhalten als hinreichend gut erfüllt angenommen. Außerdem variiert in diesem Bereich die charakteristische Länge  $L$  nur sehr gering (Garratt, 1975).

Die Bewegung einer Windfahne genügt einer Differentialgleichung 2. Ordnung (Wieringa, 1967). Das dynamische Verhalten wird dann durch zwei Konstanten, das Dämpfungsverhältnis  $\zeta$  und die Wellenlänge der ungedämpften Grundschiwingung  $\lambda_n$  beschrieben. Das Dämpfungsverhältnis ist dabei definiert als Quotient der tatsächlichen zur kritischen Dämpfung, wobei man unter kritischer Dämpfung die Dämpfung versteht, bei der sich die Anzeige des Meßgerätes asymptotisch dem Meßwert annähert. Bei Dämpfungsverhältnissen  $0.5 < \zeta < 0.7$  besitzt das Meßgerät eine ausreichend schnelle Ansprechbarkeit sowie kleine Fehler in der Frequenzanzeige (MacCready und Jex, 1964). Die benutzten Windmeßgeräte erfüllen mit  $0.61 \leq \zeta \leq 0.65$  diese Anforderung. Bei solchen Dämpfungsverhältnissen treten Schwankungen der Anzeige um den tatsächlichen Meßwert auf, die durch die Wellenlänge der gedämpften Grundschiwingung  $\lambda_d$  der Windfahne oder durch  $\lambda_n$  charakterisiert werden können (Camp et al., 1970). Aus  $\lambda_n$  läßt sich gemeinsam mit  $\zeta$  die 'delay distance'  $Dd$  nach Gl. (90) berechnen (MacCready und Jex, 1964):

$$Dd = \frac{\lambda_n}{6.0 - 2.4 \cdot \zeta} \quad (90)$$

Diese Größe kann zur Abstimmung der dynamischen Eigenschaften der Fahne mit denen des Propellers benutzt werden. So sind nach MacCready und Jex (1964) beide Sensoren gut aufeinander abgestimmt, wenn gilt:  $Dd=L$ .

Die Meßungenauigkeiten, die durch die dynamischen Eigenschaften von Windvektorfahnen hervorgerufen werden, sind von verschiedenen Autoren bereits mehrfach zusammengestellt worden (z.B. MacCready, 1966; Acheson, 1970). Außerdem sind einige Methoden zur Korrektur der gemessenen Winddaten veröffentlicht worden (z.B. Horst, 1973; Pond et al., 1979). Die im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Windmeßwerte wurden basierend auf der von Horst (1973) vorgeschlagenen Methodik und hierzu durchgeführter Messungen im Windkanal des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München korrigiert. Das Frequenzverhalten des Propellers wurde durch einen frequenzabhängigen Faktor, wie er von Garratt (1975) sowie Francey und Sahashi (1979) vorgeschlagen wurde, berücksichtigt. Mit diesen Korrekturen zeigte sich, daß in dem für die vorliegende Problematik relevanten Frequenzbereich Windmessungen mit 'Gill Anemometer Bivanes' vollständig ausreichen. Die Unzulänglichkeiten dieser Windmeßgeräte bei Frequenzen  $f > 1$  Hz sind für die Erfassung dynamischer Windlasten auf Bäume nicht von Bedeutung, da die in diesem Frequenzbereich vorhandene 'Windenergie' für den Bruch oder Wurf eines Baumes nicht mehr ausreicht.

#### 6.2.2 Baumschwingungsaufnehmer

Die direkte Messung horizontaler Auslenkungen von Bäumen bzw. Baumstämmen ist mit Schwierigkeiten verbunden. Insbesondere in größerer Höhe fehlt ein unmittelbarer Festpunkt, auf den bezogen die Auslenkungen gemessen werden können. So ist z.B. die von Holbo et al. (1978, 1980) angewandte Methode, die Auslenkungen der Baumstämme mit Wegaufnehmern über zwei, im rechten Winkel zueinander am Baumstamm befestigten Drahtseilen zu messen, aus systematischen Gründen ausgeschieden worden. Optische

Messungen vom Boden aus, wie z.B. mit Laserstrahlen oder Theodoliten, sind sehr aufwendig und insbesondere im Bestand zur Erfassung dynamischer Baumreaktionen ungeeignet. Aus diesen Gründen wurden als Meßgrößen für die Baumschwingungen die Stammbeschleunigungen gewählt. Da sie stark von baumspezifischen Eigenschaften beeinflußt sind, werden sie in dieser Arbeit als 'Baumbeschleunigungen' bezeichnet.

Die Baumbeschleunigungen wurden mit Beschleunigungsaufnehmern des Typs B12/200 der Firma Hottinger Baldwin in drei Höhen erfaßt. Hierzu wurden die Meßfühler in jeder Meßhöhe in zwei zueinander orthogonalen Richtungen horizontal in den Baumstamm geschraubt. Ungeachtet der spezifischen Ausformungen des Einzelbaumes waren dies immer die Ost- und die Nordseite des Stammes. Die Meßhöhen wurden für jeden Versuchsbaum in Abhängigkeit von seiner Höhe unter der Annahme eines einseitig eingespannten Stabes mit kreisförmigem Querschnitt bestimmt. Diese Höhen entsprachen den Knotenabständen der ersten und zweiten Oberschwingung vom freien Ende des eingespannten Stabes. Es zeigte sich zudem, daß die so bestimmten Höhen im allgemeinen in der Nähe des Kronenschwerpunktes und -ansatzes sowie im oberen Stammraum lagen.

Der prinzipielle Aufbau der verwendeten Beschleunigungsaufnehmer ist schematisch in Abb. 22 wiedergegeben. Das mechanische Prinzip dieses Meßgerätes besteht aus einer mit einer Feder in einem Gehäuse aufgehängten Masse, deren Bewegung gegenüber dem Gehäuse gedämpft ist. Die zu messende Beschleunigung wird vom Aufnehmergehäuse über die Feder auf die Masse übertragen. Die dabei eintretende relative Verschiebung der Masse gegen das Gehäuse ist ein Maß für die Beschleunigung. Die Masse ist als Anker der induktiven Differentialdrossel ausgebildet und bewirkt durch die von der zu messenden Beschleunigung hervorgerufenen Verschiebung in beiden Spulen eine gegensinnige Veränderung der Induktivitäten.

Für die verwendeten Beschleunigungsaufnehmer gibt der Herstel-

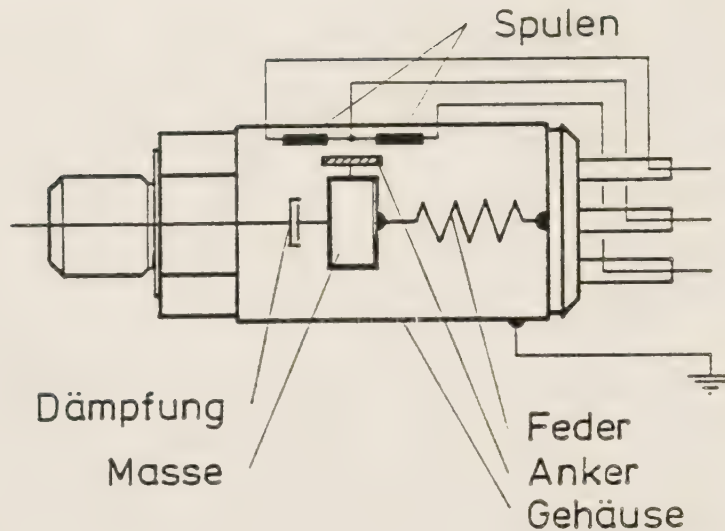


Abb. 22: Schematischer Aufbau eines Beschleunigungsaufnehmers B12/200 der Firma Hottinger Baldwin (nach Hottinger Baldwin, 1976)

ler einen Arbeitsbereich zwischen 0 Hz und 100 Hz an, in dem Beschleunigungen zwischen  $0 \text{ m/s}^2$  und  $200 \text{ m/s}^2$  gemessen werden können. In Verbindung mit einem Trägerfrequenz-Meßverstärker der Gruppe KWS 73 der Firma Hottinger Baldwin wird in Abhängigkeit vom eingestellten Meßbereich eine Auflösung bis zu  $0.001 \text{ m/s}^2$  erreicht. Dies entspricht unter der Annahme einer reinen Sinusschwingung mit einer Frequenz  $f=0.25 \text{ Hz}$  einer Amplitude von  $0.05 \text{ m}$  (Hottinger Baldwin, 1976). Bei maximalen horizontalen Beschleunigungen, die bei Bäumen in der Größenordnung von  $5 \text{ m/s}^2$  liegen, führt dies zu Schwingungsamplituden von  $2 \text{ m}$ . Die bei den Messungen auftretenden Abweichungen des tatsächlichen Baumbeschleunigungsvektors vom horizontalen wurden hier als vernachlässigbar klein behandelt.

Einen erheblichen Einfluß auf die Dämpfung der Masse in einem Beschleunigungsaufnehmer besitzt die Umgebungstemperatur. Bei  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  hat nach Angaben des Herstellers das Dämpfungsverhältnis  $\Delta$  den Wert  $\Delta=0.6$ . In dem bei diesen Untersuchungen vorherrschenden Temperaturbereich zwischen  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  schwankt die Dämpfung zwischen  $\Delta=1.3$  und  $\Delta=0.8$  (Hottinger Baldwin,

1976). Dies beeinflußt die Höhe des Maximums der Vergrößerungsfunktion, die als Amplitudenverhältnis von der Relativbewegung der Masse gegen das Gehäuse zu der erregenden Bewegung definiert ist. Außerdem verlagert sich das Maximum in Richtung niedrigerer Frequenzen, es fällt also nicht mehr mit der Eigenresonanz des ungedämpften Aufnehmers zusammen. Dazu kommt eine weitere, gleichsinnige Verlagerung der Resonanzfrequenz bei flüssigkeitsgedämpften Systemen infolge einer Vergrößerung der bewegten Masse durch mitbewegtes Dämpfungsl. Diese Meßfehler treten allerdings erst bei Frequenzen  $f > 40$  Hz auf, die bei Baumschwingungsuntersuchungen nicht mehr betrachtet werden. In dem für diese Untersuchung relevanten Frequenzbereich  $f < 2.5$  Hz wurde deshalb keine Korrektur der mit den Beschleunigungsaufnehmern erfaßten Werte durchgeführt.

Ein weiterer Fehler ergibt sich aus der Verzögerung der Beschleunigungsanzeige gegenüber der wirkenden Beschleunigung. Dabei muß beachtet werden, daß diese Phasenverschiebung für Grund- und Oberschwingungen unterschiedlich groß ist. Da jedoch bei der später durchgeführten Frequenzanalyse die Phasenbeziehung ohnehin verlorenght, wird zur weiteren Diskussion dieses Einflusses auf die Literatur des Herstellers verwiesen (Hottinger Baldwin, 1976).

### 6.3 Datenerfassung und -aufbereitung

Die Signale der drei verwendeten Windmeßgeräte und der sechs Beschleunigungsaufnehmer wurden mit einer Datenerfassungsanlage der Firma Hewlett-Packard on-line aufgezeichnet. Ein Schema dieser Anlage ist in Abb. 23 dargestellt. Sie besteht aus einem Scanner HP3495A, einem Digital-Voltmeter HP3437A, einem Diskettenlaufwerk HP9895A und einem Rechner HP9835A mit einer Real-time-clock HP98035A.

Für jede 'Gill Anemometer Bivane' waren drei Kanäle und für jeden Beschleunigungsaufnehmer ein Kanal zur Datenübertragung notwendig, so daß im gesamten 15 Kanäle abgefragt werden muß-

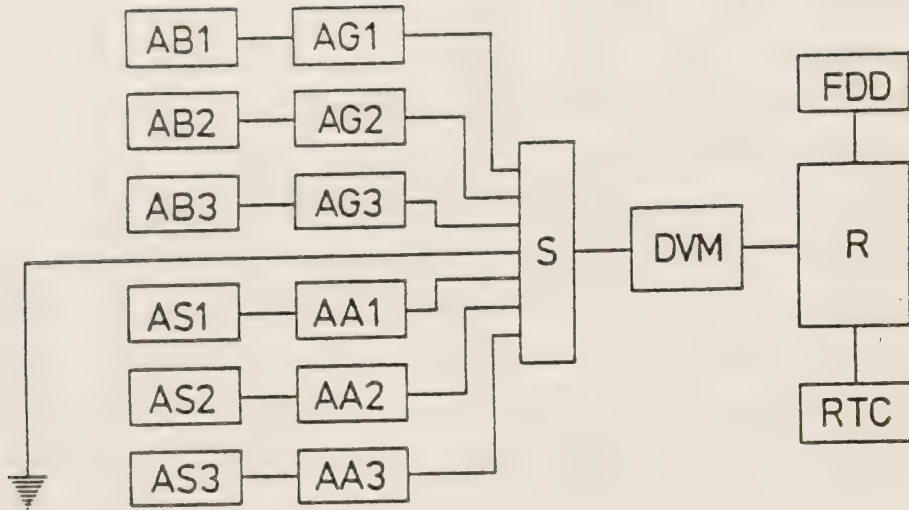


Abb. 23: Schema der Meßwerterfassung zur Untersuchung windinduzierter Baumschwingungen; AS1, AS2, AS3: Beschleunigungsaufnehmerpaare je Meßhöhe, AB1, AB2, AB3: Gill anemometer bivanes, AA1, AA2, AA3: Trägerfrequenz-Meßverstärker für Beschleunigungsaufnehmer (paarweise), AG1, AG2, AG3: Meßverstärker für Gill anemometer bivanes, S: Scanner, DVM: Digital-Voltmeter, RTC: Real-time-clock, FDD: Diskettenlaufwerk, R: Rechner

ten. Von den verbleibenden Kanälen wurde einer zur Übertragung eines Nullsignals benutzt, das durch das Kurzschließen zweier unbenutzter Leitungen erzeugt wurde. Um die Kabeleinflüsse zu minimieren, wurden nur abgeschirmte Kabel verwendet. Die Einflüsse der Leitungen für die Übertragung der Beschleunigungswerte wurden zusätzlich durch angelötete Kondensatoren reduziert.

Die an den 16 Kanälen anstehenden Spannungen wurden sofort auf Disketten abgespeichert. Bei der gewählten Scanrate von 2.5 Hz konnten auf eine Diskette Meßwerte von nahezu einer Stunde abgespeichert werden. Für die weitere Verarbeitung standen somit Zeitreihen der Wind- und Beschleunigungsvektorkomponenten zur Verfügung, deren Einzelwerte einen zeitlichen Abstand von 0.4

s besaßen. Die bei einer Spektralanalyse wichtige Nyquist-Frequenz  $f_N$  ergibt sich nach Gl. (91)

$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (91)$$

mit einem Zeitintervall  $\Delta t = 0.4$  s zu  $f_N = 1.25$  Hz. Bei der Abfrage der Kanäle trat eine Verzögerung von 0.08 s auf, was einer Verzögerung von 5 ms in der Abtastung zweier Kanäle entspricht. Für die weitere Verarbeitung wurden diese Verzögerungszeiten vernachlässigt und angenommen, daß alle Werte gleichzeitig gemessen wurden. Die Datenkontrolle und die Berechnungen wurden anschließend an der Großrechenanlage IBM3081 des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durchgeführt.

Zur weiteren Bearbeitung der Messungen wurden die erfaßten Werte in Serien mit 4400 Einzelwerten aufgeteilt. Dies entspricht einer Dauer von beinahe 30 Minuten, was für eine sinnvolle Untersuchung der hier vorliegenden Problematik mit statistischen Methoden ausreichend ist. Dazu wurden die Windvektowerte, die komponentenweise in einem polaren Koordinatensystem gemessen wurden, in einem rechtwinkligen Koordinatensystem dargestellt. Die positive  $x_1$ -Achse dieses Koordinatensystems war in die mittlere Strömungsrichtung, die positive  $x_2$ - und  $x_3$ -Achse jeweils senkrecht zur  $x_1$ -Achse in lateraler bzw. vertikaler Richtung orientiert. Dieses Koordinatensystem erfüllte die in den folgenden Gleichungen angeführten Bedingungen:

$$\overline{u_1} = |\overline{\vec{u}}| \quad (92 \text{ a})$$

$$\overline{u_2} = 0.0 \text{ m/s} \quad (92 \text{ b})$$

$$\overline{u_3} = 0.0 \text{ m/s} \quad (92 \text{ c})$$

In diesem Koordinatensystem, das in der Mikrometeorologie häufig für die Analyse von Ergebnissen aus unterschiedlichen Meß-

serien benutzt wird, bezeichnet  $|\vec{u}|$  den Betrag des mittleren Windvektors und  $\bar{j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  die Mittelwerte der longitudinalen, lateralen und vertikalen Windvektorkomponenten. Durch die hierzu notwendige Drehung des Koordinatensystems wird insbesondere der Einfluß der unterschiedlichen mittleren Windrichtungen in den verschiedenen Meßläufen ausgeschaltet, was eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den einzelnen Meßserien ermöglicht.

Die Koordinatentransformationen erfolgten nach den bekannten Beziehungen, die u.a. in Bronstein und Semendjajew (1976) enthalten sind. Für die bei den Transformationen durchgeführten Drehungen in der horizontalen Ebene mußte allerdings zuerst der aus den meteorologischen Messungen berechnete Drehwinkel  $\theta_{\text{met}}$  in den benötigten mathematischen Drehwinkel  $\theta_{\text{math}}$  umgewandelt werden. Der Zusammenhang der beiden Drehwinkel ist durch Gl. (93) gegeben:

$$\theta_{\text{math}} = 450^\circ - \theta_{\text{met}} \quad (93)$$

In Gl. (93) ist der Unterschied zwischen den Winkelangaben im meteorologischen Koordinatensystem, die, beginnend in der Nordrichtung, im Uhrzeigersinn von  $0^\circ$  auf  $360^\circ$  zunehmen, und denen im mathematischen System mit Beginn im Osten und einer Zunahme von  $0^\circ$  auf  $360^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn wiedergegeben.

Die in der beschriebenen Weise gedrehten Windvektorwerte bildeten die Grundlage zur Berechnung der Windlastspektren. Um die Spektren der Baumreaktionen, die über die Spektralmethode theoretisch aus den Spektren der Windlast ermittelt wurden, mit denen, die aus den Meßwerten berechnet wurden, vergleichen zu können, wurden die gemessenen Baumbeschleunigungen in Baumauslenkungen umgerechnet. Die Bestimmung der Auslenkung  $Y(t)$  einer beliebigen Schwingung aus deren Beschleunigung erfolgte mit dem Duhamel-Integral, wobei diese Bezeichnung aus der Aero-

elastik übernommen wurde. Dieses Integral ist u.a. bei Försching (1974) oder Nieser (1974) ausführlich erläutert, so daß hier keine näheren Einzelheiten dazu angeführt werden.

Vor der Berechnung der Spektren der horizontalen Baumauslenkungen wurden die Werte der Baumauslenkungen analog zu Gl. (92 a) und Gl. (92 b) gedreht. Die Mittelwerte der longitudinalen und lateralen Komponente  $\bar{y}_j$ ,  $j=y_1, y_2$  des Vektors  $\vec{y}$  der horizontalen Baumauslenkungen genügten somit folgenden Gleichungen:

$$\bar{y}_1 = |\bar{\vec{y}}| \quad (94 \text{ a})$$

$$\bar{y}_2 = 0.0 \text{ m} \quad (94 \text{ b})$$

In Gl. (94 a) wird mit  $|\bar{\vec{y}}|$  der Betrag des mittleren horizontalen Auslenkungsvektors bezeichnet.

#### 6.4 Übersicht über die Messungen

In den Jahren 1983 und 1984 wurden umfangreiche Messungen auf den Versuchsflächen im Ebersberger Forst, Forstenrieder Park und Hofoldingener Forst durchgeführt. Von den zahlreichen Meßserien wurden einige ausgewählt, anhand derer die Problematik 'windinduzierte Baumschwingungen' in den folgenden Abschnitten diskutiert wird. In Tab. 7 sind die verwendeten Meßläufe zusammengestellt.

Tab. 7: Verzeichnis der ausgewählten Meßläufe aus den Meßkampagnen im Ebersberger Forst (E), Forstenrieder Park (F) und Hofoldingener Forst (H); Zahlen in Klammern: Baumnummern

| Meßlauf | Datum     | Beginn<br>MEZ | Ort | Baumnr. | Windmessungen |               |               | Baumschwingungsmessungen |               |               |
|---------|-----------|---------------|-----|---------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|---------------|---------------|
|         |           |               |     |         | Höhe1<br>in m | Höhe2<br>in m | Höhe3<br>in m | Höhe1<br>in m            | Höhe2<br>in m | Höhe3<br>in m |
| M2      | 31.1.1983 | 15.02         | F   | 1       | -             | 7.5           | 15.0          | 6.0                      | 12.0          | 20.0          |
| M3      | 31.1.1983 | 15.32         | F   | 1       | -             | 7.5           | 15.0          | 6.0                      | 12.0          | 20.0          |
| M7      | 31.1.1983 | 18.04         | F   | 1       | -             | 7.5           | 15.0          | 6.0                      | 12.0          | 20.0          |
| M1      | 4.1.1984  | 10.45         | E   | 30,31   | 34.0          | 24.0          | 24.0          | 24.5(30)                 | 14.5(30)      | 25.0(31)      |
| M3      | 4.1.1984  | 11.45         | E   | 30,31   | 34.0          | 24.0          | 34.0          | 24.5(30)                 | 14.5(30)      | 25.0(31)      |
| M4      | 4.1.1984  | 12.14         | E   | 30,31   | 34.0          | 24.0          | 34.0          | 24.5(30)                 | 14.5(30)      | 25.0(31)      |
| M5      | 4.1.1984  | 12.52         | E   | 30,31   | 34.0          | 24.0          | 34.0          | 24.5(30)                 | 14.5(30)      | 25.0(31)      |
| M8      | 4.1.1984  | 14.23         | E   | 30,31   | 34.0          | 24.0          | 34.0          | 24.5(30)                 | 14.5(30)      | 25.0(31)      |
| M6      | 7.2.1984  | 13.49         | H   | 11,12   | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 15.0(11)                 | 9.0(11)       | 15.0(12)      |
| M9      | 7.2.1984  | 15.20         | H   | 11,12   | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 15.0(11)                 | 9.0(11)       | 15.0(12)      |
| M10     | 7.2.1984  | 15.50         | H   | 11,12   | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 15.0(11)                 | 9.0(11)       | 15.0(12)      |
| M2      | 8.2.1984  | 9.50          | H   | 11      | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 15.0                     | 9.0           | 4.5           |
| M4      | 8.2.1984  | 10.49         | H   | 11      | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 15.0                     | 9.0           | 4.5           |
| M2      | 30.5.1984 | 8.30          | F   | 1,7     | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 20.0(1)                  | 12.0(1)       | 20.0(7)       |
| M4      | 30.5.1984 | 9.30          | F   | 1,7     | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 20.0(1)                  | 12.0(1)       | 20.0(7)       |
| M7      | 30.5.1984 | 11.18         | F   | 1,7     | 3.7           | 7.5           | 15.0          | 20.0(1)                  | 12.0(1)       | 20.0(7)       |

## 7 Windmessungen

Aus meteorologischer Sicht wird das Schwingungsverhalten eines Baumes im wesentlichen durch die bestehende Wetterlage, den damit zusammenhängenden Bodenzustand und durch das lokale Strömungsfeld bestimmt (Geiger, 1950). Letzteres wird durch die orographische Mikroklimalage und die Bestandsgestaltung geprägt. Deshalb werden im folgenden die zu den Meßterminen im südbayerischen Raum vorherrschenden Wetterlagen über Angaben aus dem Europäischen Wetterbericht des Deutschen Wetterdienstes charakterisiert und zu den lokalen Windverhältnissen auf den Versuchsflächen in Beziehung gesetzt.

### 7.1 Wetterlagen und mittlere Windverhältnisse

Während der Messungen am 31.1.1983 im Forstenrieder Park wurde das großräumige Wettergeschehen durch eine zyklonale Westlage bestimmt. Dabei entwickelte sich ein Tief westlich von Irland zum Orkantief mit einem Kerndruck von 950 hPa und zog am

Tab. 8: Windverhältnisse an der Station München-Riem des Deutschen Wetterdienstes (DWD) an den Meßtagen; dd: Windrichtung in 10 Grad-Abstufungen, ff: Windgeschwindigkeit in m/s (aus Europäischem Wetterbericht des DWD)

| Uhrzeit<br>in MEZ | 31.1.1983 |      | 4.1.1984 |      | 7.2.1984 |      | 8.2.1984 |      | 30.5.1984 |     |
|-------------------|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|-----------|-----|
|                   | dd        | ff   | dd       | ff   | dd       | ff   | dd       | ff   | dd        | ff  |
| 01.00 Uhr         | 26        | 7.2  | 26       | 10.8 | 25       | 15.5 | 26       | 5.1  | 24        | 2.6 |
| 04.00 Uhr         | 25        | 10.3 | 26       | 10.8 | 25       | 19.1 | 26       | 6.2  | 24        | 2.6 |
| 07.00 Uhr         | 25        | 8.8  | 26       | 13.4 | 25       | 15.5 | 24       | 5.7  | 22        | 3.1 |
| 10.00 Uhr         | 26        | 8.8  | 26       | 10.3 | 25       | 18.6 | 19       | 5.1  | 27        | 3.6 |
| 13.00 Uhr         | 27        | 8.8  | 26       | 8.8  | 33       | 11.9 | 20       | 5.7  | 25        | 3.6 |
| 16.00 Uhr         | 26        | 7.7  | 25       | 7.2  | 27       | 4.1  | 26       | 13.9 | 30        | 2.6 |
| 19.00 Uhr         | 24        | 6.7  | 24       | 6.7  | 22       | 5.1  | 25       | 9.3  | 28        | 3.1 |
| 22.00 Uhr         | 19        | 5.1  | 26       | 7.2  | 26       | 5.7  | 29       | 8.2  | 23        | 1.5 |

1.2.1983 über die Nordsee hinweg in östlicher Richtung bis zum Skagerak. Als Folge dieser Wetterlage wurde in Südbayern frischer und zeitweise stark böiger Wind aus überwiegend westlichen Richtungen beobachtet. Die an der Station des Deutschen Wetterdienstes in München-Riem gemessenen Windgeschwindigkeiten waren während der Meßserien größer als 6.7 m/s (siehe Tab. 8).

Am 4.1.1984 wurde die Wetterlage während der Messungen im Ebersberger Forst durch eine hochreichende Kaltluft gekennzeichnet, die auf der Rückseite eines über Skandinavien angegangenen Sturmtiefs nach Mitteleuropa eingeflossen war. Gleichzeitig entwickelte sich ein Sturmtief südlich von Grönland zum Orkantief und zog Richtung Island. Dies führte in Bayern zu Niederschlägen, die überwiegend als Schnee fielen, und zu Westwinden. An diesem Tag traten in München-Riem während der Meßserien Windgeschwindigkeiten zwischen 10.2 m/s und 7.2 m/s auf (siehe Tab. 8).

Die Messungen im Hofoldinger Forst wurden in meteorologischer Hinsicht am 7.2.1984 durch eine starke westliche, nordatlantische Strömung geprägt. In ihr zog eine um 1.00 Uhr MEZ südlich von Grönland angelangte Störung rasch zu den Britischen Inseln. Ihre Okklusion erfaßte im Laufe des folgenden Tages Deutschland. Außerdem verlagerte sich am 8.2.1984 das Tief mit Schwerpunkt vor der norwegischen Küste nach Südschweden. Gleichzeitig weitete sich der Keil des Azorenhochs zum europäischen Nordmeer aus und bildete im weiteren Verlauf eine Brücke zum russischen Hoch. An diesen beiden Tagen kam es deshalb in Südbayern wiederholt zu Niederschlägen, die im Flachland als Regen und am 7.2.1984 in höheren Lagen über 800 m als Schnee fielen. Der Wind war am 7.2.1984 lebhaft und am 8.2.1984 auffrischend, was in Böen zu starkem bis stürmischem Wind führte. Wie aus den Stationsdaten von München-Riem zu entnehmen ist, war an beiden Tagen die vorherrschende Windrichtung West mit schwachen bis mäßigen Windgeschwindigkeiten (siehe Tab. 8).

Tab. 9: Betrag des mittleren Windvektors  $|\bar{\vec{u}}|$  (in m/s) und mittlerer Azimutwinkel  $\bar{\alpha}$  (in Grad) pro Meßlauf für die ausgewählten Meßläufe

|               | Höhe1             |                | Höhe2             |                | Höhe3             |                |
|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
|               | $ \bar{\vec{u}} $ | $\bar{\alpha}$ | $ \bar{\vec{u}} $ | $\bar{\alpha}$ | $ \bar{\vec{u}} $ | $\bar{\alpha}$ |
|               | m/s               | Grad           | m/s               | Grad           | m/s               | Grad           |
| M2, 31.1.1983 | -                 | -              | 4.2               | 269            | 4.5               | 249            |
| M3, 31.1.1983 | -                 | -              | 4.2               | 271            | 4.7               | 250            |
| M7, 31.1.1983 | -                 | -              | 3.4               | 256            | 3.5               | 237            |
| M1, 4.1.1984  | 3.4               | 237            | 0.6               | 222            | 3.6               | 241            |
| M3, 4.1.1984  | 3.8               | 240            | 0.7               | 222            | 3.9               | 243            |
| M4, 4.1.1984  | 3.6               | 240            | 0.4               | 230            | 3.8               | 246            |
| M5, 4.1.1984  | 3.6               | 241            | 0.6               | 219            | 3.6               | 245            |
| M8, 4.1.1984  | 3.2               | 232            | 0.6               | 219            | 2.9               | 239            |
| M6, 7.2.1984  | 1.1               | 302            | 1.2               | 302            | 1.4               | 349            |
| M9, 7.2.1984  | 0.7               | 289            | 0.9               | 298            | 1.0               | 336            |
| M10, 7.2.1984 | 0.6               | 300            | 0.8               | 300            | 1.0               | 328            |
| M2, 8.2.1984  | 0.7               | 126            | 0.8               | 159            | 1.1               | 200            |
| M4, 8.2.1984  | 0.7               | 167            | 0.9               | 188            | 1.2               | 196            |
| M2, 30.5.1984 | 1.6               | 226            | 1.8               | 248            | 2.3               | 224            |
| M4, 30.5.1984 | 1.4               | 232            | 1.5               | 253            | 2.0               | 231            |
| M7, 30.5.1984 | 1.6               | 232            | 1.8               | 251            | 2.3               | 230            |

Während der zweiten Meßkampagne am 30.5.1985 im Forstenrieder Park zog ein Tief über dem südlichen Niedersachsen südsüdwestwärts und schwächte sich dabei ab. Das umfangreiche Niederschlagsgebiet an seiner West- und Südseite verlagerte sich nur langsam nach Süden. In Südbayern führte dies gelegentlich zu Regen, der im Tagesverlauf nachließ, und zu schwachem Wind aus Südwest bis West. Während der Meßläufe wurden in München-Riem Windgeschwindigkeiten um 3.6 m/s registriert (siehe Tab. 8).

Ein Vergleich der Windgeschwindigkeiten von der Station München-Riem in Tab. 8 mit den in Tab. 9 enthaltenen Beträgen des

mittleren Windvektors pro Meßserie zeigt den starken Einfluß des Waldes auf die Windmessungen auf den Versuchsflächen. Die Beträge des mittleren Windvektors erreichten bei keinem Meßlauf die entsprechenden Windgeschwindigkeitswerte von München-Riem. Dies ist auf die große Reibung des Untergrundes und die Windschutzwirkung der umstehenden Bäume auf den Versuchsflächen zurückzuführen.

Die Standardhöhe für Windmessungen in völlig freiem Gelände beträgt 10.0 m über dem Boden (WMO, 1983), während die Messungen im Ebersberger Forst jedoch nur 1 m über der Bestandshöhe bzw. 9 m unterhalb von ihr durchgeführt wurden. Somit ist eine Kennzeichnung der Windverhältnisse aufgrund von Tab. 9 mit den im meteorologischen Sprachgebrauch allgemein üblichen Begriffen irreführend. Dasselbe gilt auch für die Windmessungen aus dem Forstenrieder Park und aus dem Hofoldinger Forst, da hier der Windvektor möglichst nahe an den jeweiligen Versuchsbäumen erfaßt wurde, um so die tatsächlichen Windverhältnisse in der Umgebung des jeweiligen Baumes beschreiben zu können. Dies widerspricht jedoch der Voraussetzung 'völlig freies Gelände', die nur dann erfüllt ist, wenn das nächste Hindernis mindestens das 10-fache seiner Höhe von der Meßstelle entfernt ist (WMO, 1983). Legt man deshalb zur Charakterisierung der mittleren Windverhältnisse während der Meßserien die Angaben aus Tab. 8 zugrunde, so kann man die Windverhältnisse bei den Meßläufen im Forstenrieder Park als 'schwach' bis 'frisch', die im Ebersberger Forst als 'frisch' und die im Hofoldinger Forst als 'mäßig' bis 'stark' kennzeichnen.

Ein Vergleich der Windrichtungen aus Tab. 8 mit den mittleren Azimutwerten aus Tab. 9 zeigt eine gute Übereinstimmung, was aufgrund von Kanalisierungseffekten an den Bestandsrändern oder wegen der unterschiedlichen Rauigkeiten über dem Wald und über dem Meßgelände in München-Riem nicht zu erwarten war. Vergleicht man nun die Windmessungen aus den verschiedenen Höhen miteinander, so bemerkt man teilweise erhebliche Änderungen der mittleren Azimutwinkel mit zunehmender Höhe. Bei den

Messungen im Ebersberger Forst ist dies auf die starke Windscherung im Kronenraum zurückzuführen (z.B. Smith et al., 1972), was durch die Werte aus 34.0 m knapp über der Bestandshöhe und den Werten aus 24.0 m im Kronenraum eindeutig belegt wird. Aus der Theorie sind nämlich in der bodennahen Luftschicht nur geringe Windrichtungsänderungen mit zunehmender Höhe zu erwarten. So gibt z.B. Roth (1964) die Änderung der Windrichtung in einer 10 m hohen Luftschicht mit  $\Delta\alpha=0.41^\circ$  an. Dieses Ergebnis wurde allerdings aus Messungen über Grasland gewonnen, wo die Voraussetzungen, die zu dem theoretisch abgeleiteten Ergebnis führen, im Gegensatz zu den vorliegenden Messungen hinreichend gut erfüllt waren (Lettau und Davidson, 1957).

## 7.2 Momente der Häufigkeitsverteilungen der Windvektorkomponenten

In Tab. 10 sind die Mittelwerte der Varianz  $\sigma^2$ , Schiefe S und Kurtosis K der Windvektorkomponenten im strömungsorientierten Koordinatensystem pro Meßfläche und Höhe zusammengestellt. Die longitudinale Windvektorkomponente  $u_1$  kann mit Ausnahme der Messungen aus 15.0 m Höhe im Hofdinger Forst in guter Näherung als normalverteilt angesehen werden. Die Normalverteilung besitzt eine Schiefe  $S=0.0$  und eine Kurtosis  $K=3.0$ . Die angegebenen Werte von S und K stimmen vergleichsweise gut mit den Werten  $S=0.1$  und  $K=2.6$  von Hennemuth (1978) überein, die aus Messungen in 0.8 m Höhe ermittelt wurden. Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß  $\bar{S}$  an der Bestandshöhe des Ebersberger Forstes die größten Abweichungen von  $\bar{S}=0.0$  aufweist und die Abweichungen von  $\bar{K}$  aus Tab. 10 von  $K=3.0$  ein anderes Vorzeichen haben als die durch den Wert  $K=2.6$  ausgedrückte Abweichung bei Hennemuth (1978). Auch andere Autoren berichteten über geringe Abweichungen der Häufigkeitsverteilungen der Windvektorkomponenten von einer Gaussverteilung, was jedoch hier nicht weiter diskutiert wird, da dies schon von Hennemuth (1978) ausführlich angesprochen wurde.

Tab. 10: Mittelwerte der Varianz  $\sigma^2$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ), Schiefe S und Kurtosis K der Windvektorkomponenten im strömungsorientierten Koordinatensystem

| Ort             | Höhe<br>m | $u_1$                                 |           |           | $u_2$                                 |           |           | $u_3$                                 |           |           |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
|                 |           | $\sigma^2$<br>$\text{m}^2/\text{s}^2$ | $\bar{S}$ | $\bar{K}$ | $\sigma^2$<br>$\text{m}^2/\text{s}^2$ | $\bar{S}$ | $\bar{K}$ | $\sigma^2$<br>$\text{m}^2/\text{s}^2$ | $\bar{S}$ | $\bar{K}$ |
| Forst.<br>Park  | 3.7       | 1.0                                   | 0.1       | 2.9       | 1.1                                   | 0.4       | 2.9       | 0.2                                   | -0.1      | 3.9       |
|                 | 7.5       | 2.5                                   | 0.2       | 3.0       | 2.7                                   | 0.1       | 3.0       | 1.5                                   | 0.2       | 3.3       |
|                 | 15.0      | 2.5                                   | 0.3       | 3.2       | 2.1                                   | 0.2       | 3.2       | 1.4                                   | -0.1      | 3.2       |
| Ebers.<br>Forst | 34.0      | 5.4                                   | 0.8       | 3.4       | 3.1                                   | -0.2      | 3.8       | 1.7                                   | -0.4      | 3.5       |
|                 | 24.0      | 1.0                                   | 0.1       | 3.3       | 1.4                                   | -0.3      | 3.4       | 0.7                                   | -0.6      | 3.5       |
|                 | 34.0      | 5.9                                   | 0.8       | 3.4       | 3.0                                   | -0.1      | 4.0       | 1.6                                   | -0.3      | 3.4       |
| Hofol.<br>Forst | 3.7       | 0.3                                   | 0.7       | 3.4       | 0.2                                   | -0.1      | 5.2       | 0.1                                   | -2.4      | 16.0      |
|                 | 7.5       | 0.4                                   | 0.5       | 3.6       | 0.4                                   | -0.1      | 5.9       | 0.1                                   | -1.1      | 9.7       |
|                 | 15.0      | 0.6                                   | 1.5       | 5.4       | 0.4                                   | -0.1      | 6.7       | 0.2                                   | -1.9      | 11.7      |

Während auch die laterale und vertikale Windvektorkomponente häufig durch eine Normalverteilung angenähert werden können (Lumley und Panofsky, 1964), ist dies bei den vorliegenden Messungen nur eingeschränkt möglich. Einer Gaussverteilung kommen die Messungen aus dem Forstenrieder Park am nächsten, während an der Bestandshöhe im Ebersberger Forst und am Waldrand im Hofoldingener Forst dies bei der  $u_2$ - und  $u_3$ -Komponente nicht mehr vertreten werden kann. Hierin zeigt sich der Umgebungseinfluß, durch den die Windgeschwindigkeit sowohl an der Bestandshöhe als auch am Waldrand stark abgebremst wird. Damit wird die tatsächliche Verteilung dieser Windvektorkomponenten einseitig, da sie nun z.B. nicht mehr symmetrisch um den Mittelwert schwanken.

Die Mittelwerte der Schiefe S haben bei der longitudinalen Komponente in allen Höhen und auf allen Versuchsflächen ein positives Vorzeichen, was eine Neigung der Verteilung zu kleineren Werten hin anzeigt. Die Schiefen der beiden anderen Kom-

ponenten besitzen bei den Messungen im Ebersberger und im Hofoldingener Forst in allen Höhen ein negatives Vorzeichen, wobei die Abweichungen der  $u_3$ -Komponente von einer Normalverteilung größer als die der  $u_2$ -Komponente sind. Eine Analyse der Mittelwerte  $\bar{K}$  der Kurtosis der lateralen und vertikalen Windvektorkomponente bestätigt diese Abweichungen von einer Normalverteilung. Bis auf zwei Ausnahmen bei der  $u_2$ -Komponente (Forst. Park, 3.7 m und 7.5 m) ist  $\bar{K}$  immer größer als 3.0, was bedeutet, daß die Verteilungsfunktionen spitzer als eine Normalverteilung verlaufen. Außerdem gilt auf den Meßflächen im Forstenrieder Park und im Hofoldingener Forst für jede Höhe sowie im Kronenraum des Ebersberger Forstes:  $\overline{K_{u_1}} \leq \overline{K_{u_2}} \leq \overline{K_{u_3}}$ . Nur in 34.0 m Höhe im Ebersberger Forst, also knapp über der Bestandshöhe, kann diese Abhängigkeit nicht bestätigt werden.

Ein Vergleich der Zentralmomente 3. und 4. Ordnung der longitudinalen Windvektorkomponente mit den entsprechenden Momenten der horizontalen Windgeschwindigkeit bei Allen (1968) zeigt keine Übereinstimmung. Während bei Allen (1968) sowohl die Schiefe  $S$  als auch die Kurtosis  $K$  maximale Werte in der Höhe erreichten, in der der Bestand am dichtesten war, ist dies im Ebersberger Forst genau umgekehrt. Der Mittelwert von  $S$  in 24.0 m Höhe - hier sind Kronenbreite und -dichte maximal - ist bei der  $u_1$ -Komponente deutlich geringer als in 34.0 m Höhe, während  $\bar{K}$  in 24.0 m Höhe nahezu den gleichen Wert wie in 34.0 m Höhe besitzt. Im Stammraum hingegen bestätigen die vorliegenden Ergebnisse die von Allen (1968) gefundene Zunahme von  $S$  und  $K$  mit zunehmender Höhe, wobei als einzige Ausnahme im Hofoldingener Forst  $\bar{S}$  in 7.5 m Höhe geringer als in 3.7 m Höhe ist.

### 7.3 Turbulenzkenngrößen

Die Turbulenzkenngrößen wurden nach den im Abschnitt 3.2 angegebenen Definitionen berechnet und sind in Tab. 11 bis Tab. 13, aufgeteilt nach Versuchsflächen und Meßhöhen, zusammengestellt. In diesen Tabellen sind die komponentenweise aufgedichteten

Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  sowie die mittleren Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  pro Meßserie enthalten. Zur Berechnung der  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  wurde jeder Meßlauf in 11 Intervalle mit jeweils einer Dauer  $t'=160$  s aufgeteilt, über die anschließend gemittelt wurde.

Prinzipiell werden durch die Ergebnisse in Tab. 11 bis Tab. 13 die Aussagen von Cionco (1972 a) für die longitudinale Turbu-

Tab. 11: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  sowie mittlere Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Forstenrieder Park am 31.1.1983 und 30.5.1984

| Meßlauf       | Höhe<br>in m | $i_{u_1}$ | $i_{u_2}$ | $i_{u_3}$ | $\frac{i_{u_2}}{i_{u_1}}$ | $\frac{i_{u_3}}{i_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_2}}$ | $\overline{GT_{u_3}}$ |
|---------------|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| M2, 31.1.1983 | 3.7          | -. -      | -. -      | -. -      | -. -                      | -. -                      | -. -                  | -. -                  | -. -                  |
|               | 7.5          | 0.5       | 0.5       | 0.4       | 1.0                       | 0.8                       | 2.4                   | 1.4                   | 1.2                   |
|               | 15.0         | 0.4       | 0.4       | 0.3       | 1.0                       | 0.8                       | 2.2                   | 1.1                   | 0.9                   |
| M3, 31.1.1983 | 3.7          | -. -      | -. -      | -. -      | -. -                      | -. -                      | -. -                  | -. -                  | -. -                  |
|               | 7.5          | 0.6       | 0.6       | 0.4       | 1.0                       | 0.7                       | 2.5                   | 1.5                   | 1.2                   |
|               | 15.0         | 0.5       | 0.4       | 0.3       | 0.8                       | 0.8                       | 2.2                   | 1.1                   | 0.9                   |
| M7, 31.1.1983 | 3.7          | -. -      | -. -      | -. -      | -. -                      | -. -                      | -. -                  | -. -                  | -. -                  |
|               | 7.5          | 0.5       | 0.5       | 0.4       | 1.0                       | 0.8                       | 2.3                   | 1.4                   | 1.2                   |
|               | 15.0         | 0.4       | 0.4       | 0.4       | 1.0                       | 1.0                       | 2.2                   | 1.2                   | 0.9                   |
| M2, 30.5.1984 | 3.7          | 0.6       | 0.7       | 0.3       | 1.2                       | 0.5                       | 2.3                   | 1.5                   | 0.9                   |
|               | 7.5          | 0.4       | 0.5       | 0.2       | 1.2                       | 0.5                       | 1.9                   | 1.0                   | 0.5                   |
|               | 15.0         | 0.5       | 0.5       | 0.3       | 1.0                       | 0.6                       | 2.0                   | 0.9                   | 0.9                   |
| M4, 30.5.1984 | 3.7          | 0.8       | 0.7       | 0.1       | 0.9                       | 0.1                       | 2.4                   | 1.4                   | 0.7                   |
|               | 7.5          | 0.5       | 0.5       | 0.3       | 1.0                       | 0.6                       | 2.0                   | 1.0                   | 0.5                   |
|               | 15.0         | 0.6       | 0.5       | 0.4       | 0.8                       | 0.7                       | 2.2                   | 1.2                   | 1.0                   |
| M7, 30.5.1984 | 3.7          | 0.6       | 0.7       | 0.3       | 1.2                       | 0.5                       | 2.4                   | 1.6                   | 0.8                   |
|               | 7.5          | 0.5       | 0.5       | 0.1       | 1.0                       | 0.2                       | 2.0                   | 1.2                   | 0.4                   |
|               | 15.0         | 0.5       | 0.5       | 0.3       | 1.0                       | 0.6                       | 2.0                   | 1.0                   | 0.8                   |

lenzintensität  $i_{u_1}$  bestätigt. Auf allen Versuchsflächen und in allen Meßhöhen liegen die longitudinalen Turbulenzintensitäten im Bereich  $0.4 \leq i_{u_1} \leq 0.8$ , also um den Wert  $i_{u_1} = 0.6$ , den Cionco (1972 a) für lichte Wälder angibt. Nur im Ebersberger Forst betragen in 24.0 m Höhe ( $z/H=0.73$ ) diese Werte im Mittel  $i_{u_1} = 1.7$ . Dies bestätigt die Abhängigkeit der longitudinalen Turbulenzintensität von der Vertikalverteilung der Blattflächen. Wie auch aus Abb. 5 zu entnehmen ist, besitzt  $i_{u_1}$  im Kronenraum die höchsten Werte und nimmt sowohl zur Bestands- höhe als auch zum Erdboden hin ab. Obwohl die Umgebungsbedin- gungen auf den drei Versuchsflächen sehr unterschiedlich sind,

Tab. 12: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $\frac{i_{u_2}}{i_{u_1}}$  und  $\frac{i_{u_3}}{i_{u_1}}$  sowie mittlere Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Ebersberger Forst am 4.1.1984

| Meßlauf      | Höhe<br>in m | $i_{u_1}$ | $i_{u_2}$ | $i_{u_3}$ | $\frac{i_{u_2}}{i_{u_1}}$ | $\frac{i_{u_3}}{i_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_2}}$ | $\overline{GT_{u_3}}$ |
|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| M1, 4.1.1984 | 34.0         | 0.7       | 0.6       | 0.4       | 0.9                       | 0.6                       | 3.1                   | 1.6                   | 1.0                   |
|              | 24.0         | 2.0       | 2.4       | 1.9       | 1.2                       | 1.0                       | 4.8                   | 4.4                   | 4.3                   |
|              | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 3.0                   | 1.5                   | 1.0                   |
| M3, 4.1.1984 | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 3.0                   | 1.3                   | 1.0                   |
|              | 24.0         | 1.6       | 1.9       | 1.1       | 1.2                       | 0.7                       | 4.8                   | 4.3                   | 2.2                   |
|              | 34.0         | 0.7       | 0.4       | 0.4       | 0.6                       | 0.6                       | 3.0                   | 1.3                   | 1.0                   |
| M4, 4.1.1984 | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 3.1                   | 1.4                   | 1.1                   |
|              | 24.0         | 1.9       | 2.4       | 1.9       | 1.3                       | 1.0                       | 6.6                   | 5.5                   | 3.9                   |
|              | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 2.9                   | 1.3                   | 0.9                   |
| M5, 4.1.1984 | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 2.9                   | 1.5                   | 1.0                   |
|              | 24.0         | 1.6       | 2.0       | 1.5       | 1.3                       | 0.9                       | 4.8                   | 4.3                   | 3.4                   |
|              | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 2.9                   | 1.5                   | 0.9                   |
| M8, 4.1.1984 | 34.0         | 0.6       | 0.4       | 0.3       | 0.7                       | 0.5                       | 2.9                   | 1.3                   | 0.8                   |
|              | 24.0         | 1.4       | 1.6       | 1.2       | 1.1                       | 0.9                       | 3.9                   | 3.5                   | 2.7                   |
|              | 34.0         | 0.7       | 0.5       | 0.3       | 0.7                       | 0.4                       | 3.0                   | 1.4                   | 1.0                   |

belegen doch die Größenordnungen der Werte aus dem Stammraum im Hofoldingener Forst und im Forstenrieder Park sowie an der Bestandshöhe im Ebersberger Forst grundsätzlich die angegebene Höhenabhängigkeit von  $i_{u_1}$ . Im Stammraum selbst ist  $i_{u_1}$  nahezu höhenkonstant, wobei im Forstenrieder Park eine geringe Abnahme mit zunehmender Höhe zu bemerken ist, was durch den niederen Bewuchs am Waldboden bedingt ist.

Die Ergebnisse der Messungen aus dem Hofoldingener Forst und an der Bestandshöhe des Ebersberger Forstes stimmen inhaltlich mit den Ergebnissen von Shaw et al. (1974 a) und Mayer (1981)

Tab. 13: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $\frac{i_{u_2}}{i_{u_1}}$  und  $\frac{i_{u_3}}{i_{u_1}}$  sowie mittlere Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Hofoldingener Forst am 7./8.2.1984

| Meßläufe      | Höhe<br>in m | $i_{u_1}$ | $i_{u_2}$ | $i_{u_3}$ | $\frac{i_{u_2}}{i_{u_1}}$ | $\frac{i_{u_3}}{i_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_1}}$ | $\overline{GT_{u_2}}$ | $\overline{GT_{u_3}}$ |
|---------------|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| M6, 7.2.1984  | 3.7          | 0.8       | 0.5       | 0.2       | 0.6                       | 0.3                       | 3.5                   | 1.3                   | 0.5                   |
|               | 7.5          | 0.7       | 0.6       | 0.3       | 0.9                       | 0.4                       | 3.1                   | 2.0                   | 0.7                   |
|               | 15.0         | 0.7       | 0.6       | 0.4       | 0.9                       | 0.6                       | 4.1                   | 2.5                   | 2.1                   |
| M9, 7.2.1984  | 3.7          | 0.8       | 0.7       | 0.6       | 0.9                       | 0.8                       | 3.1                   | 1.9                   | 1.0                   |
|               | 7.5          | 0.7       | 0.6       | 0.3       | 0.9                       | 0.4                       | 3.3                   | 2.0                   | 0.7                   |
|               | 15.0         | 0.7       | 0.5       | 0.4       | 0.7                       | 0.6                       | 3.3                   | 1.8                   | 1.0                   |
| M10, 7.2.1984 | 3.7          | 0.7       | 0.9       | 0.9       | 1.3                       | 1.3                       | 2.8                   | 2.3                   | 1.8                   |
|               | 7.5          | 0.7       | 0.8       | 0.4       | 1.1                       | 0.6                       | 3.0                   | 2.6                   | 0.9                   |
|               | 15.0         | 0.6       | 0.6       | 0.3       | 1.0                       | 0.5                       | 3.3                   | 1.9                   | 0.9                   |
| M2, 8.2.1984  | 3.7          | 0.8       | 0.6       | 0.4       | 0.8                       | 0.5                       | 3.0                   | 1.7                   | 0.7                   |
|               | 7.5          | 0.8       | 0.8       | 0.6       | 1.0                       | 0.8                       | 2.8                   | 2.2                   | 0.8                   |
|               | 15.0         | 0.7       | 0.6       | 0.3       | 0.9                       | 0.4                       | 3.0                   | 1.6                   | 1.1                   |
| M4, 8.2.1984  | 3.7          | 0.7       | 0.6       | 0.4       | 0.9                       | 0.6                       | 3.1                   | 1.6                   | 0.7                   |
|               | 7.5          | 0.7       | 0.7       | 0.3       | 1.0                       | 0.4                       | 2.8                   | 1.8                   | 0.6                   |
|               | 15.0         | 0.6       | 0.5       | 0.3       | 0.8                       | 0.5                       | 3.3                   | 1.4                   | 1.2                   |

überein, so daß im Mittel auch in und über diesem Bestand gilt:  $i_{u_1} > i_{u_2} > i_{u_3}$ . In einer anderen Form wird diese Beziehung auch durch die Ergebnisse für die Verhältnisse  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  ausgedrückt. Während im gesamten Stammraum die Werte von  $i_{u_2}/i_{u_1}$  im Mittel um  $i_{u_2}/i_{u_1} = 0.9$  schwanken, ergeben sich an der Bestandshöhe im Ebersberger Forst mit  $i_{u_2}/i_{u_1} = 0.7$  und  $i_{u_3}/i_{u_1} = 0.6$  nahezu die von Mayer (1985) ermittelten Zahlen. Da im Zeitraum zwischen den vorliegenden Messungen und denen von Mayer (1985) auf der Versuchsfläche eine Durchforstung stattgefunden hat, ist dieses Ergebnis keinesfalls trivial. Die Turbulenzintensitäten hängen von der mittleren Windgeschwindigkeit, der atmosphärischen Schichtung und der Rauigkeit des Untergrundes ab (Cionco, 1972 a). Die Messungen in dieser Untersuchung wie auch die Messungen von Mayer (1985) wurden unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt, also bei mittleren Windvektorbeträgen an der Bestandshöhe zwischen 3 m/s und 4 m/s sowie nahezu adiabatischer Schichtung. Daraus kann gefolgert werden, daß durch die Durchforstung die Rauigkeit des Bestandes nur gering beeinflußt wurde. Da die Rauigkeit über Waldbeständen selbst aber von der Windgeschwindigkeit abhängt, muß diese Aussage auf den angegebenen Geschwindigkeitsbereich beschränkt werden.

Eine Sonderstellung nehmen die Meßläufe im Forstenrieder Park und die Messungen in 24.0 m Höhe im Ebersberger Forst ein. Bei diesen Messungen gilt im Mittel:  $i_{u_1} \geq i_{u_2} > i_{u_3}$ . Während im Kronenraum des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst die laterale Turbulenzintensität deutlich größer als die longitudinale ist, sind im Forstenrieder Park diese beiden Maßzahlen ungefähr gleich groß. Dies deutet darauf hin, daß im unteren Teil des Stammraumes des Bestandes im Forstenrieder Park ein horizontal homogenes Windfeld ausgeprägt ist. Für eine Diskussion dieser Hypothese müssen jedoch auch die zeitlichen Fluktuationen im Windfeld berücksichtigt werden, was an späterer Stelle mit Hilfe der Spektren der Windvektorkomponenten durchgeführt werden soll.

Zunächst werden jedoch die Eigenschaften des Windfeldes anhand der mittleren Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , der mittleren Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und der mittleren Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  beschrieben.

Der mittlere Böigkeitsfaktor wird mit zunehmender Meßlaufdauer  $T$  und abnehmender mittlerer Windgeschwindigkeit größer (Davis und Newstein, 1968; Grimm, 1968). Außerdem wird wegen des abnehmenden Einflusses der Bodenrauigkeit  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  mit ansteigender Höhe geringer (Deacon, 1955; Wieringa, 1973). Diese allgemeinen Gesetzmäßigkeiten besitzen aber in und über Vegetationsformen nur eine eingeschränkte Gültigkeit. Wie die Meßserien im Hofoldinger Forst und im Forstenrieder Park zeigen, besteht im Stammraum keine eindeutige Abnahme der mittleren Böigkeitsfaktoren mit zunehmender Höhe. Vielmehr deutet sich bei  $\overline{GT_{u_1}}$  ein Minimum im Stammraum in 7.5 m Höhe an (siehe Tab. 11 und Tab. 13). Bei  $\overline{GT_{u_2}}$  und  $\overline{GT_{u_3}}$  hingegen ist ein Minimum im Stammraum nicht eindeutig ausgeprägt. Solche Minima können damit erklärt werden, daß in diesem Bereich die maximalen Abweichungen vom Betrag des mittleren Windvektors geringer sind als in den benachbarten Höhenniveaus. Das von einigen Autoren (z.B. Allen, 1968; Shaw, 1977) in diesen Höhen des Stammraumes beobachtete sekundäre Maximum im Vertikalprofil der mittleren Windgeschwindigkeit begünstigt zusätzlich die Ausbildung des Minimums im Vertikalprofil der longitudinalen mittleren Böigkeitsfaktoren.

Die Ergebnisse der Messungen im Ebersberger Forst in Tab. 12 zeigen, daß  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  im Kronenraum maximale Werte aufweist und zur Bestandshöhe hin wieder abnimmt. Zusammen mit den Ergebnissen von den beiden anderen Versuchsflächen, ist auch bei diesen Kenngrößen der Einfluß der Vertikalverteilung der Blattflächen zu erkennen. Unabhängig davon gilt auf allen Versuchsflächen für die drei Komponenten der mittleren Böigkeitsfaktoren in jeder Meßhöhe:  $\overline{GT_{u_1}} > \overline{GT_{u_2}} \geq \overline{GT_{u_3}}$ .

Um bessere Erkenntnisse über die Windvektorfluktuationen zu

erhalten, können sie z.B. komponentenweise über Schwellenwerte zu den jeweiligen Mittelwerten in Beziehung gebracht werden. Die so ermittelten Windgeschwindigkeitsbereiche bezeichnete Platow (1970) als Böen. Ihre über die Meßlaufdauer  $T$  gemittelte Dauer  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und ihre mittleren Folgezeiten  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  sind in Tab. A1 bis Tab. A6 des Anhanges komponentenweise für jeden Meßlauf und jede Meßhöhe zusammengestellt. In Anlehnung an Platow (1970) und Mayer (1981) wurden für die Berechnungen als Schwellenwerte  $Sw$  die folgenden Werte gewählt: 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 und 0.50. Insbesondere bei niederen Schwellenwerten treten dann Böen auf, die länger als 10 s andauern. Solche Böen werden hier nicht betrachtet, da sich einerseits gezeigt hat, daß für die Baumschwingungsproblematik Böendauern interessant sind, die gemeinsam mit den entsprechenden Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen gleich der Grundswingungsdauer eines Baumes sind (Amtmann, 1981). Andererseits liegen typische Grundswingungsdauern für Fichten (*Picea abies*) im Bereich von 5 s (Mayer, 1979), so daß durch die angegebene Einschränkung die Aussagen über die dynamische Windbelastung von Fichten nicht beeinflußt werden. Aus diesen Gründen sind in Tab. A1 bis Tab. A6 alle mittleren Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und alle mittleren Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , die größer als 9.9 s sind, durch 'xxx' gekennzeichnet und werden in der Diskussion nicht berücksichtigt.

Bei jeder Meßserie und in jeder Meßhöhe nehmen grundsätzlich mit zunehmendem Schwellenwert  $Sw$  alle  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  ab bzw. alle  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  zu. Im Ebersberger Forst gilt an der Bestandshöhe für alle Schwellenwerte  $Sw$ :  $\overline{t_{d,u_1}} > \overline{t_{d,u_2}} > \overline{t_{d,u_3}}$  und  $\overline{t_{z,u_1}} \leq \overline{t_{z,u_2}} \leq \overline{t_{z,u_3}}$ . Letzteres gilt auch für die Messungen im Kronenraum des Ebersberger Forstes, wobei jedoch bei den mittleren Böendauern die der lateralen Windvektorkomponente größer sind als die der vertikalen und  $\overline{t_{d,u_1}}$  dort zumeist die geringsten Werte annimmt.

Die aus den Meßserien im Forstenrieder Park und Hofoldinger

Forst berechneten  $\overline{t_{d,j}}$  und  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  lassen keine generalisierenden Aussagen zu. Während bei allen Schwellenwerten  $Sw$  in den beiden unteren Meßhöhen im Hofoldinger Forst  $\overline{t_{d,u_1}} \geq \overline{t_{d,u_2}} \geq \overline{t_{d,u_3}}$  ist, weist in diesen Höhen im Forstenrieder Park  $\overline{t_{d,u_2}}$  die größten Werte auf und nimmt dann über  $\overline{t_{d,u_1}}$  zu  $\overline{t_{d,u_3}}$  ab, wobei der letzte Zusammenhang nicht streng erfüllt ist.

Bei den mittleren Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen bestätigt sich die Tendenz  $\overline{t_{z,u_1}} \leq \overline{t_{z,u_2}} \leq \overline{t_{z,u_3}}$  sowohl in den Messungen im Hofoldinger Forst als auch im Forstenrieder Park. Insbesondere im Forstenrieder Park zeigt sich bei Schwellenwerten  $Sw \geq 0.20$  die folgende Beziehung:  $\overline{t_{z,u_2}} \geq \overline{t_{z,u_1}} > \overline{t_{z,u_3}}$ .

Berücksichtigt man bei der Interpretation von Tab. A1 bis Tab. A6 jedoch den Betrag des mittleren Windvektors  $|\overrightarrow{u}|$  aus Tab. 9, so erkennt man mit anwachsendem  $|\overrightarrow{u}|$  eine Abnahme von  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und eine Zunahme von  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ . Diese Zusammenhänge, die sich bei allen Schwellenwerten zeigen, deuten auf eine intensivere dynamische Windböigkeit bei größeren mittleren Windgeschwindigkeiten hin. Ein Vergleich zwischen den hier berechneten Böigkeitskenngrößen und den entsprechenden Angaben für andere Oberflächenarten bestärkt diese Aussage (z.B. Platow, 1970; Maitani, 1979).

Für die Problematik der windinduzierten Baumschwingungen besitzen die longitudinale Windvektorkomponente und die aus ihr abgeleiteten Böigkeitskenngrößen die größte Bedeutung. In Abhängigkeit vom Schwellenwert  $Sw$  sind aufgrund der in Tab. A1 bis Tab. A6 zusammengestellten Meßserien die Böigkeitskenngrößen am aussagekräftigsten, die mit Schwellenwerten  $0.2 \leq Sw \leq 0.4$  berechnet wurden. Kleinere Schwellenwerte sind hier ungeeignet, da sonst bei der Ermittlung der Böigkeitsmaßzahlen auch länger dauernde Windfluktuationen mit geringerer Intensität verwendet werden, die einen Baum nicht mehr dynamisch belasten können. Andererseits werden bei zu großen Schwellenwerten, wie  $Sw=0.5$ , Fluktuationen nicht mehr miterfaßt, die den Baum mit geringerer Intensität dynamisch belasten, aber unterhalb des

gewählten Grenzwertes liegen. Insbesondere am Beispiel der Meßläufe im Hofolding Forst erkennt man, daß bei zu niedrigen Beträgen des mittleren Windvektors die berechneten Böigkeitskenngrößen zur Charakterisierung der Windbelastung ungeeignet sind.

#### 7.4 Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponenten

Im Hinblick auf die dynamische Belastung von Bäumen ist die Kennzeichnung der Windböigkeit durch Turbulenzmaßzahlen allein nicht ausreichend. Wie in den Abschnitten 3.2 und 7.3 gezeigt wurde, werden sie durch Auszählungen bestimmt, wobei die zeitliche Veränderlichkeit der Windböigkeit nur ansatzweise berücksichtigt wird. Geeignete Ergebnisse lassen sich mit der in Abschnitt 5.2 angegebenen Methode über die Berechnung der Spektren der Windvektorkomponenten erzielen. Aus den Daten der Windmessungen wurden hierzu nach Gl. (2) für jeden Meßlauf die Schwankungsanteile  $j'$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  der Windvektorkomponenten ermittelt. Anschließend wurden nach der Methode von Blackman und Tukey (1958) mit Gl. (8) bis Gl. (10) komponentenweise die Windspektren  $P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  berechnet.

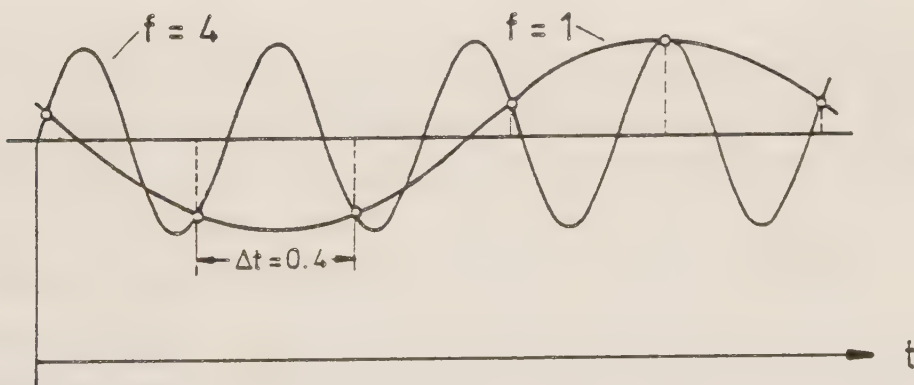


Abb. 24: 'aliasing'-Effekt bei Sinusschwingungen (nach Blackman und Tukey, 1958)

Bei der Ermittlung von Spektren aus diskreten, äquidistanten Werten, muß mit 'aliasing' gerechnet werden. Dieser Effekt, der in Abb. 24 am Beispiel einer Sinusschwingung dargestellt ist, besteht im wesentlichen darin, daß Beiträge von höheren Frequenzen zu niedrigeren hin verschoben werden. Hierdurch kann z.B. eine Sinusschwingung höherer Frequenz nicht mehr von einer entsprechenden Schwingung niedrigerer Frequenz unterschieden werden. Als Kriterium für das Auftreten von 'aliasing' wird die Nyquist-Frequenz  $f_N$  verwendet, die mit Gl. (91) berechnet werden kann.

Um den 'aliasing'-Fehler weitgehend auszuschalten, wurden die diskreten Meßwerte über  $t'=0.8$  s übergreifend gemittelt, was im mathematischen Sinn einer partiellen Tiefpaßfilterung entsprach (Taubenheim, 1969). Der dadurch entstandene Fehler bei der Berechnung der Spektren wurde durch eine Multiplikation des Spektrums mit der Filterfunktion  $H_f(f)$  korrigiert:

$$H_f(f) = \frac{\sin^2(\pi \cdot f \cdot t')}{(\pi \cdot f \cdot t')^2} \quad (95)$$

Hierin bedeuten  $t'$  das Intervall der übergreifenden Mittelung und  $f$  die Frequenz.

Alle Spektren wurden mit einer maximalen Anzahl von  $M=175$  Verschiebungen ermittelt, wobei sich die Frequenzgrenzen nach Gl. (96) aus  $hh=1$  und  $hh=M$  ergeben (z.B. Blackman und Tukey, 1958):

$$f(hh) = \frac{hh}{2 \cdot M \cdot \Delta t}, \quad hh = 1, 2, \dots, M \quad (96)$$

Aus dem zeitlichen Abstand  $\Delta t=0.4$  s zweier aufeinanderfolgender Meßwerte folgt somit für die obere Grenze der Spektren  $f=1.250$  Hz und für die untere Grenze  $f=0.007$  Hz. Weiterhin wird durch die Wahl von  $M$  die Genauigkeit der Ordinatenwerte beeinflusst. Zusammen mit der Anzahl der Meßwerte  $N$  ergeben sich die Freiheitsgrade  $Df$  nach Gl. (97) zu (Blackman und Tukey, 1958; Fiedler, 1970):

$$Df = \frac{2 \cdot N}{M} - \frac{3}{2} \quad (97)$$

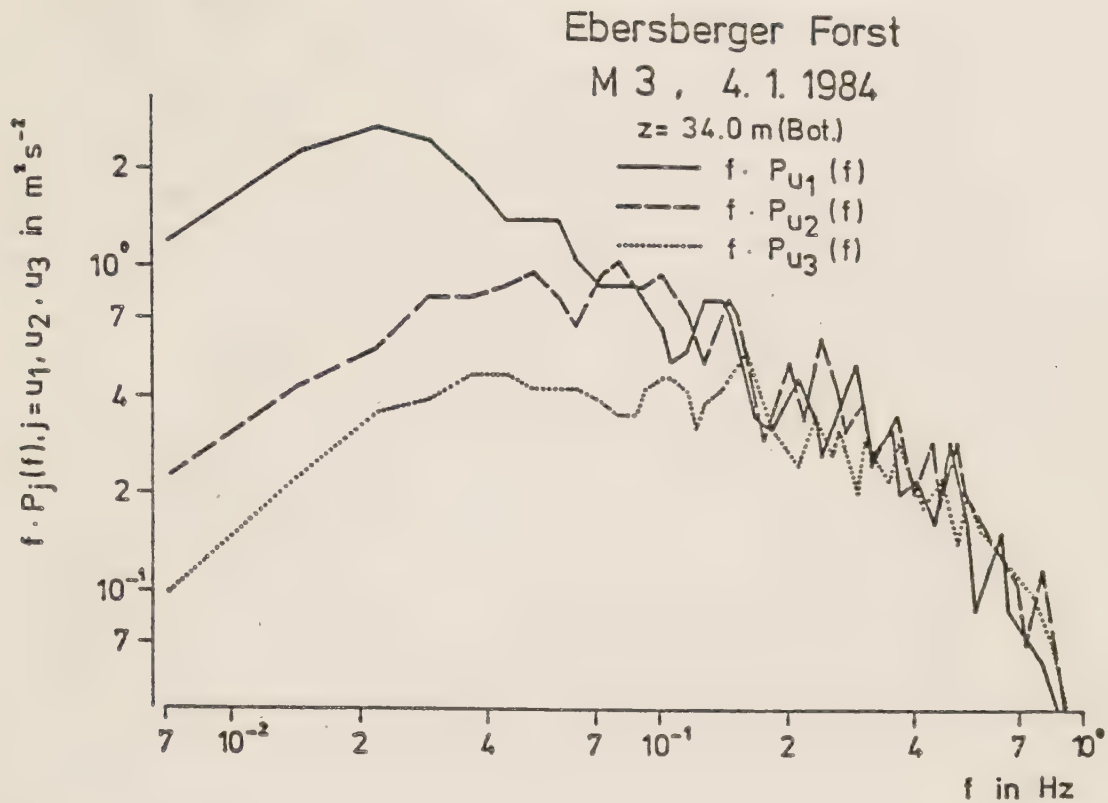


Abb. 25: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum  
(=  $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984  
des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 34.0$   
m; Meßstelle: Botanikerturm);  $f$ : Frequenz

Die Anzahl der Freiheitsgrade soll bestimmte Grenzwerte nicht unterschreiten. Aus der Literatur sind dafür u.a.  $Df \geq 5$  (Schönwiese, 1983),  $Df \geq 18.5$  (Taubenheim, 1969) oder  $Df \geq 30$  (Blackman und Tukey, 1958) bekannt. Mit  $N=4400$  und  $M=175$  errechnen sich die Freiheitsgrade näherungsweise zu  $Df=50$ .

Die Varianz  $\sigma_x^2$  für einen bestimmten Meßlauf läßt sich nach Gl. (98) aus dem Spektrum  $P_x(f)$  ermitteln, wobei  $f_1$  und  $f_2$  die Frequenzgrenzen des Spektrums sind:

$$\sigma_x^2 = \int f \cdot P_x(f) \cdot d(\ln f) = \overline{f \cdot P_x(f)} \cdot \ln \frac{f_2}{f_1} \quad (98)$$

In den Abbildungen dieser Arbeit wurden die Varianzbeiträge

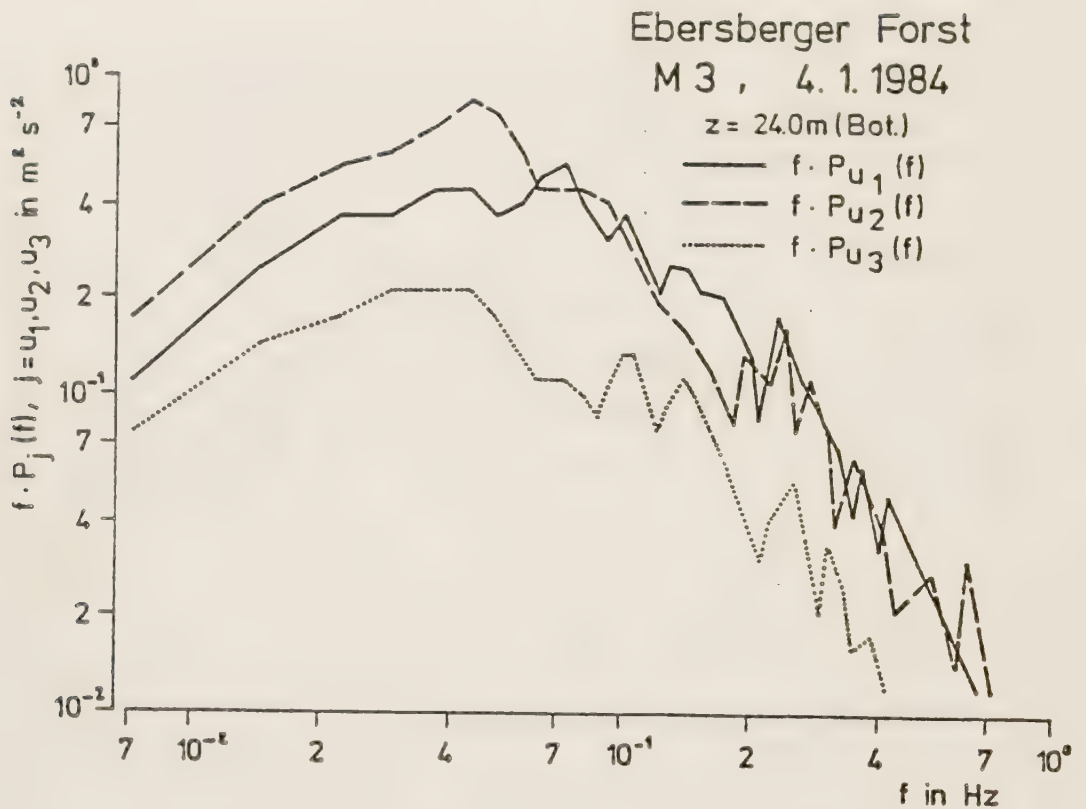


Abb. 26: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 24.0$  m; Meßstelle: Botanikerturm);  $f$ : Frequenz

der einzelnen Frequenzintervalle, also die Stützstellen des Spektrums, im niederfrequenten Teil der Spektren durch Geraden miteinander verbunden, während im hochfrequenten Teil eine Ausgleichsgerade durch die errechneten Werte gelegt wurde. Da die an der Ordinate aufgetragenen Spektralwerte von  $f \cdot P_x(f)$  häufig einige Zehnerpotenzen überstreichen, wurde neben der Frequenzachse auch die Ordinatenachse logarithmisch eingeteilt.

In Abb. 25 bis Abb. 33 sind typische Spektren der Fluktuationen der Windvektorkomponenten, die aus Messungen von den verschiedenen Versuchsflächen berechnet wurden, wiedergegeben. Im Ebersberger Forst sind knapp über der Bestandshöhe die Varianzanteile beim longitudinalen Windspektrum im Mittel größer als beim lateralen und vertikalen. Das vertikale Windspektrum weist dabei meistens die kleinsten Werte auf. Dies ist auf die

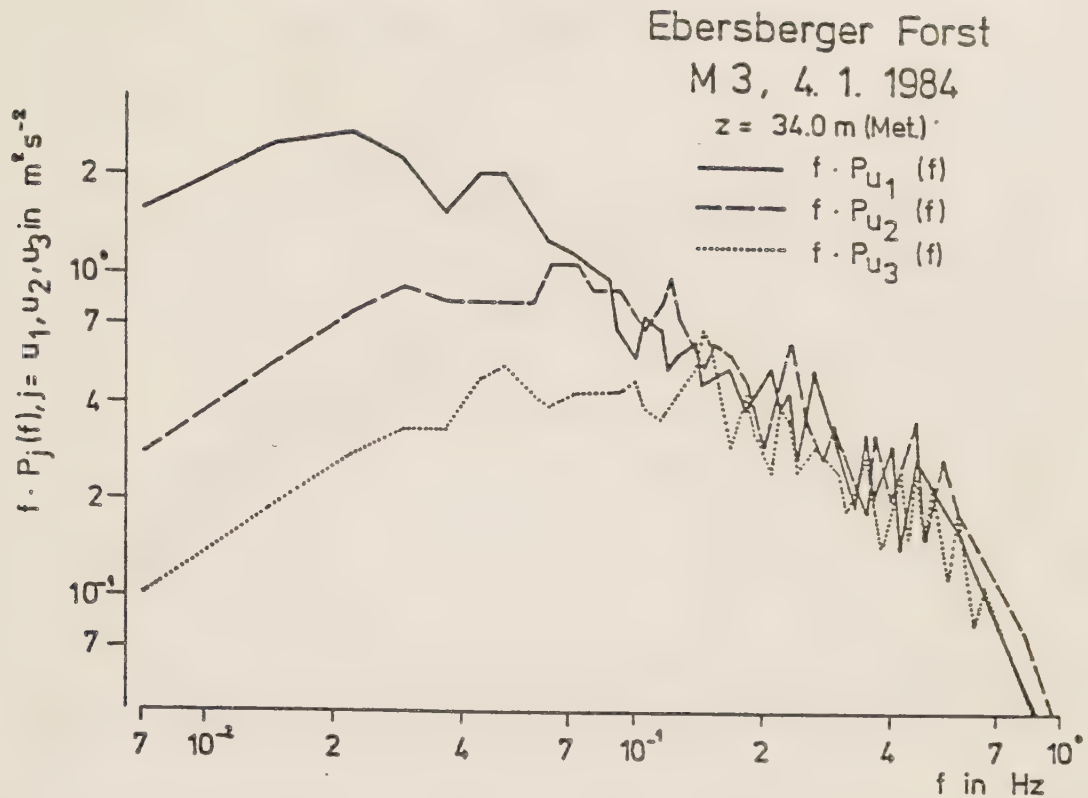


Abb. 27: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 34.0$  m; Meßstelle: Meteorologenturm);  $f$ : Frequenz

Windscherung zurückzuführen, durch die bei hohen Windgeschwindigkeiten die turbulente Energie im wesentlichen erzeugt wird. Außerdem bestätigen die unterschiedlichen Varianzen der einzelnen Windvektorkomponenten den anisotropen Charakter der Turbulenz an der Bestandshöhe dieses Fichtenhochwaldes (Henne-muth, 1978).

Erstaunlicherweise zeigen sich beim Vergleich der entsprechenden Spektren, die an zwei verschiedenen Stellen an der Bestandshöhe ermittelt wurden (siehe Abb. 25 und Abb. 27), keine großen Unterschiede, obwohl die Windmeßgeräte in Nord-Süd-Richtung ungefähr 30 m voneinander entfernt befestigt waren. Als Begründung für die geringen Unterschiede läßt sich die südwestliche Anströmung der beiden Meßgeräte während dieser

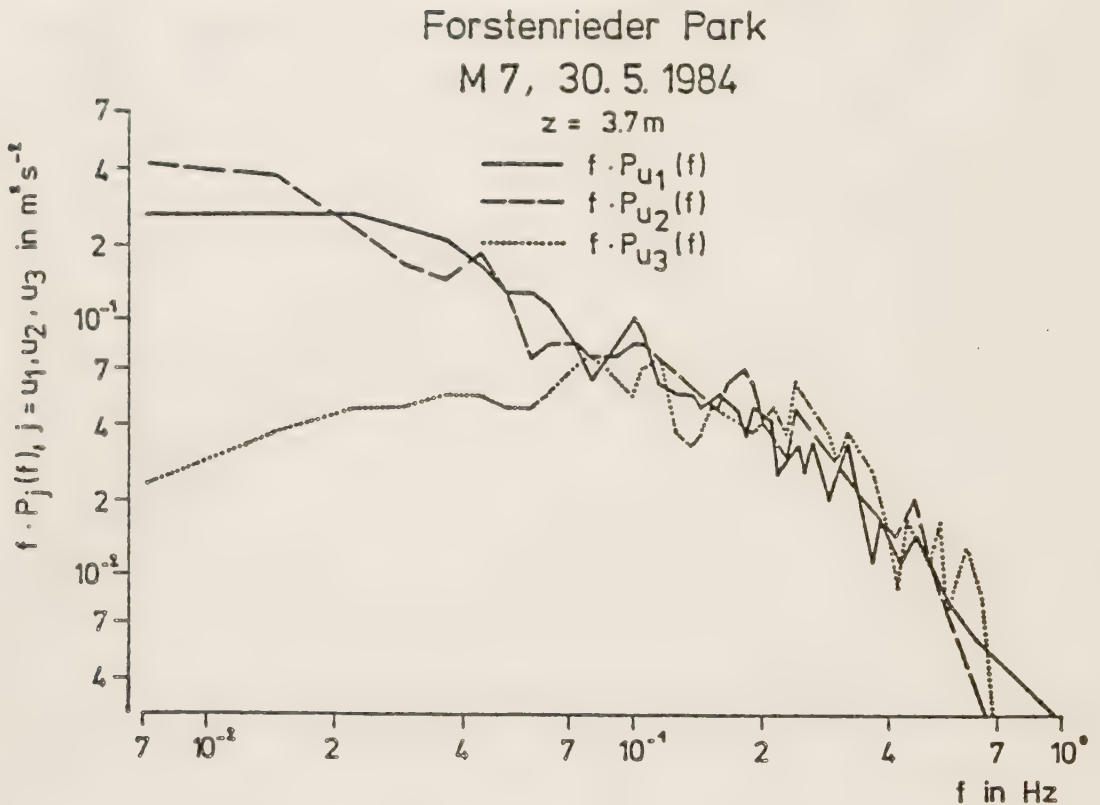


Abb. 28: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j = u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984 am Rand einer Windwurf Fläche im Forstenrieder Park ( $z = 3.7 \text{ m}$ );  $f$ : Frequenz

Meßserie anführen, so daß sich keines der Geräte im Luv oder im Lee des zweiten befand. Dies wäre jedoch in anderer Hinsicht wünschenswert gewesen, um z.B. den Effekt der Wirbelablösung an Bäumen, die zwischen den beiden Meßgeräten stockten, und die Energieübertragung von schwingenden Pflanzen zurück in die Strömung näher zu untersuchen. So ergibt sich, daß bei Starkwinden und Stürmen die Bestandshöhe eines Fichtenhochwaldes relativ homogen ist, was auf die schwingenden Bäume zurückzuführen ist, die u.a. durch ihre bewegungsinduzierte Kronenneigung die starke Strukturierung des Kronendaches, die bei windstillem Wetter zu beobachten ist, verringern.

In Abb. 26 sind Windspektren aus dem Kronenraum ( $z = 24.0 \text{ m}$ ) des Ebersberger Forstes sowie in Abb. 29 und Abb. 30 aus dem

## Forstenrieder Park

M 7, 30. 5. 1984

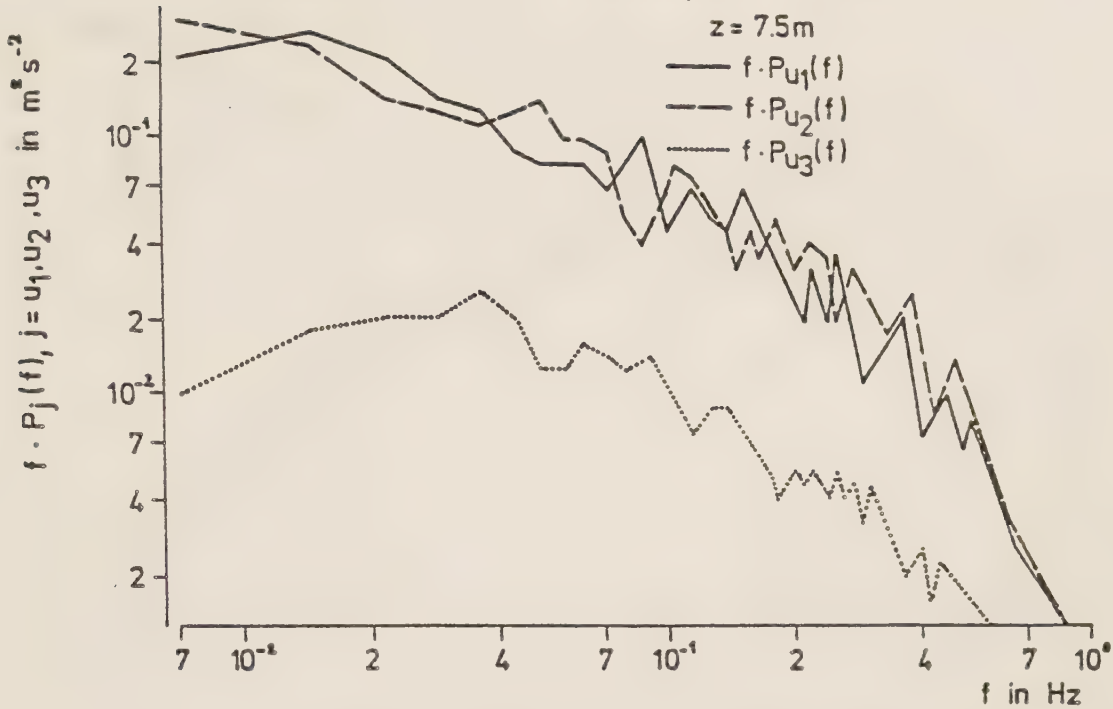
 $z = 7.5\text{m}$ 

Abb. 29: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum  
 ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984  
 am Rand einer Windwurfffläche im Forstenrieder Park  
 ( $z = 7.5 \text{ m}$ );  $f$ : Frequenz

mittleren ( $z = 7.5 \text{ m}$ ) bzw. oberen ( $z = 15.0 \text{ m}$ ) Stammraum im Forstenrieder Park dargestellt. Unter Berücksichtigung der Konfidenzgrenzen zeigen die longitudinalen und die lateralen Spektren im gesamten wiedergegebenen Frequenzbereich keine signifikanten Unterschiede. Dies deutet auf ein horizontal lokalisotropes Windfeld zwischen den Bäumen hin. Wegen der dicht stehenden Bäume ist es nämlich nicht zu erwarten, daß sowohl im Stammraum wie auch im Kronenraum die mittlere Richtung der großräumigen Strömung in irgendeiner Weise bevorzugt ist.

Die Analyse der beiden vertikalen Windspektren in Abb. 29 und Abb. 30 im Forstenrieder Park zeigt im abgebildeten Frequenzbereich eine Abnahme der Amplituden um durchschnittlich eine Zehnerpotenz von niedrigen zu hohen Frequenzen hin. Während die Varianzbeiträge des  $u_3$ -Spektrums in  $15.0 \text{ m}$  Höhe (Abb. 30)

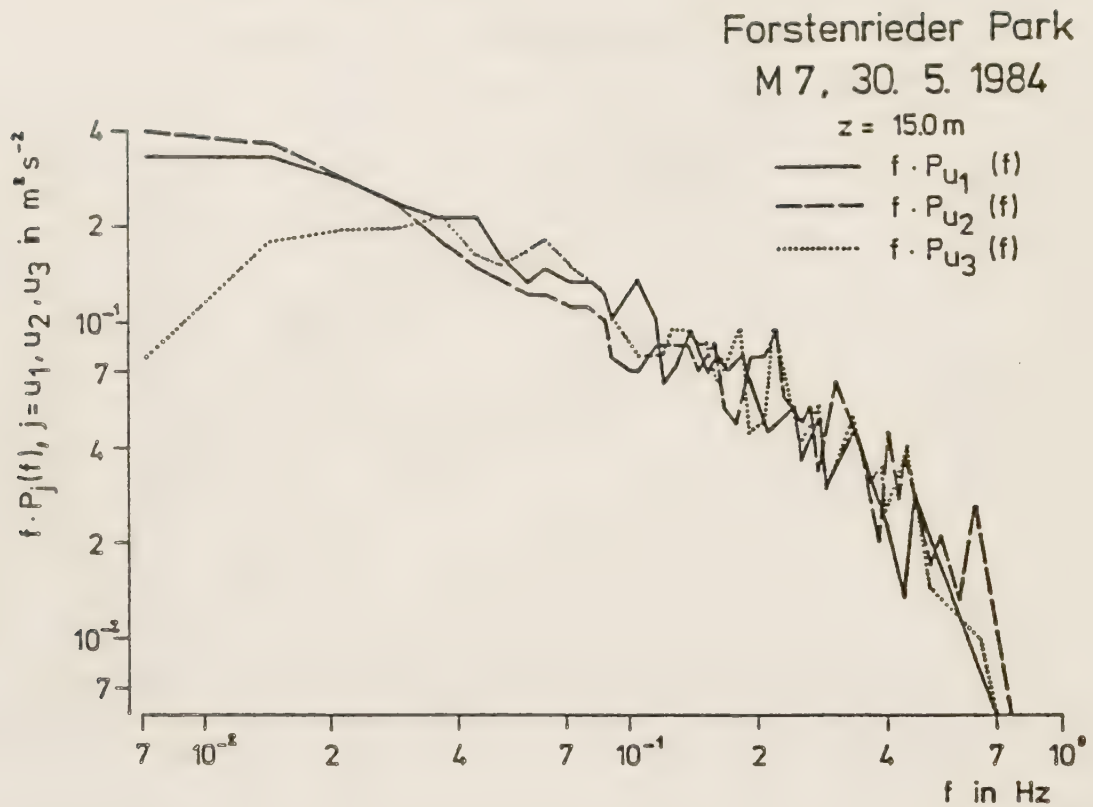


Abb. 30: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum  
( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984  
am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park  
( $z = 15.0 \text{ m}$ );  $f$ : Frequenz

ab Frequenzen  $f > 0.04 \text{ Hz}$  die gleiche Größenordnung wie die der  $u_1$ - und  $u_2$ -Spektren aufweisen, zeigt das  $u_3$ -Spektrum in  $7.5 \text{ m}$  Höhe (Abb. 29) im gesamten Frequenzbereich geringere Ordinatewerte als die  $u_1$ - und  $u_2$ -Spektren. Außerdem ist Abb. 28 und Abb. 30 zu entnehmen, daß das  $u_3$ -Spektrum in  $3.7 \text{ m}$  Höhe die größten Varianzbeiträge bei höheren Frequenzen aufweist als das entsprechende Spektrum in  $15.0 \text{ m}$  Höhe. Es liegt nahe, diesen Unterschied mit der Dissipation von turbulenter Energie zu erklären. Dabei wird mit Annäherung an den Boden der Energietransport von großen Wirbeln auf immer kleinere Wirbel übertragen, bis schließlich die gesamte Ennergie in Wärme umgewandelt ist.

Die Spektren der relativ windschwachen Meßserien aus dem Ho-

## Hofoldinginger Forst

M 10, 7.2.1984

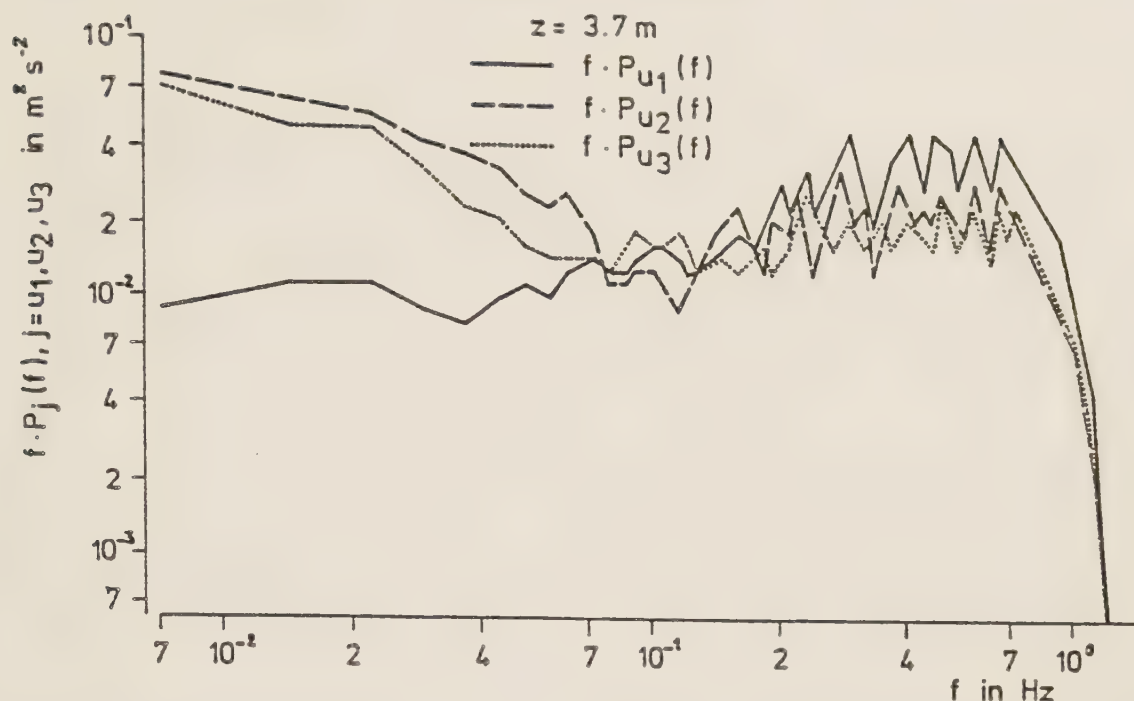


Abb. 31: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldinginger Forst ( $z = 3.7 \text{ m}$ );  $f$ : Frequenz

foldinger Forst zeigen bei einem Vergleich untereinander (Abb. 31 bis Abb. 33) kein so differenziertes Verhalten wie die Meßläufe an den anderen Meßplätzen. Bei Frequenzen  $f > 0.1 \text{ Hz}$  sind die longitudinalen und lateralen Windspektren in allen drei Meßhöhen nicht signifikant voneinander verschieden. Weiterhin weist in  $3.7 \text{ m}$  Höhe (Abb. 31) das  $u_1$ -Spektrum die geringsten Ordinatenwerte auf, während in  $7.5 \text{ m}$  Höhe (Abb. 32) das  $u_3$ -Spektrum gemeinsam mit dem  $u_2$ -Spektrum und in  $15.0 \text{ m}$  Höhe (Abb. 33) das  $u_3$ -Spektrum allein die geringsten Ordinatenwerte besitzt. Bemerkenswert sind bei den in Abb. 31 und Abb. 32 dargestellten Spektren die jeweils relativ hohen Varianzbeiträge der einzelnen Spektren im Bereich  $0.1 \text{ Hz} < f < 1.0 \text{ Hz}$  und das rasche Abfallen bei Frequenzen  $f > 1.0 \text{ Hz}$ . Dies ist auf die Unzulänglichkeiten der verwendeten 'Gill Anemometer Bivanes' zurückzuführen, die gerade bei geringen Windgeschwindigkeiten

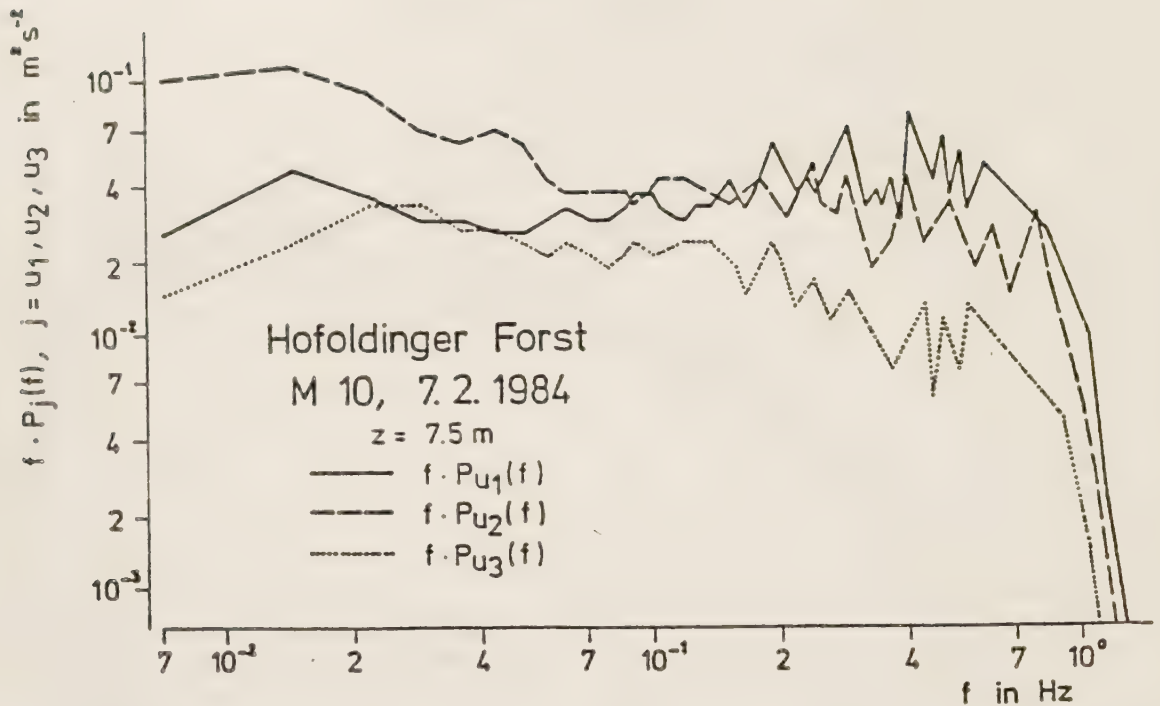


Abb. 32: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldingner Forst ( $z = 7.5$  m);  $f$ : Frequenz

die zur Berechnung des hochfrequenten Teils von Windspektren nötige feine Erfassung des lokalen Windfeldes nicht mehr gewährleisten.

Um die rein phänomenologische Beschreibung der Spektrenverläufe zu quantifizieren, wurde in Anlehnung an Ansätze verschiedener Autoren (Kaimal et al., 1972; Shaw et al., 1974 a; Silversides, 1974) versucht, die gemessenen Spektren zu parametrisieren. Diese Versuche führten jedoch zu keinem befriedigenden Ergebnis. Es war zwar möglich, durch geeignete Skalierungen und Transformationen für jede einzelne Meßserie den Spektrenverlauf theoretisch zu beschreiben, doch war die Streuung zwischen den einzelnen Meßläufen so groß, daß keine allgemeingültige Form gefunden werden konnte. Dies bestätigen auch die von Mayer (1985) durchgeführten Berechnungen. Er stellte ebenfalls große Abweichungen der theoretischen von den gemessenen

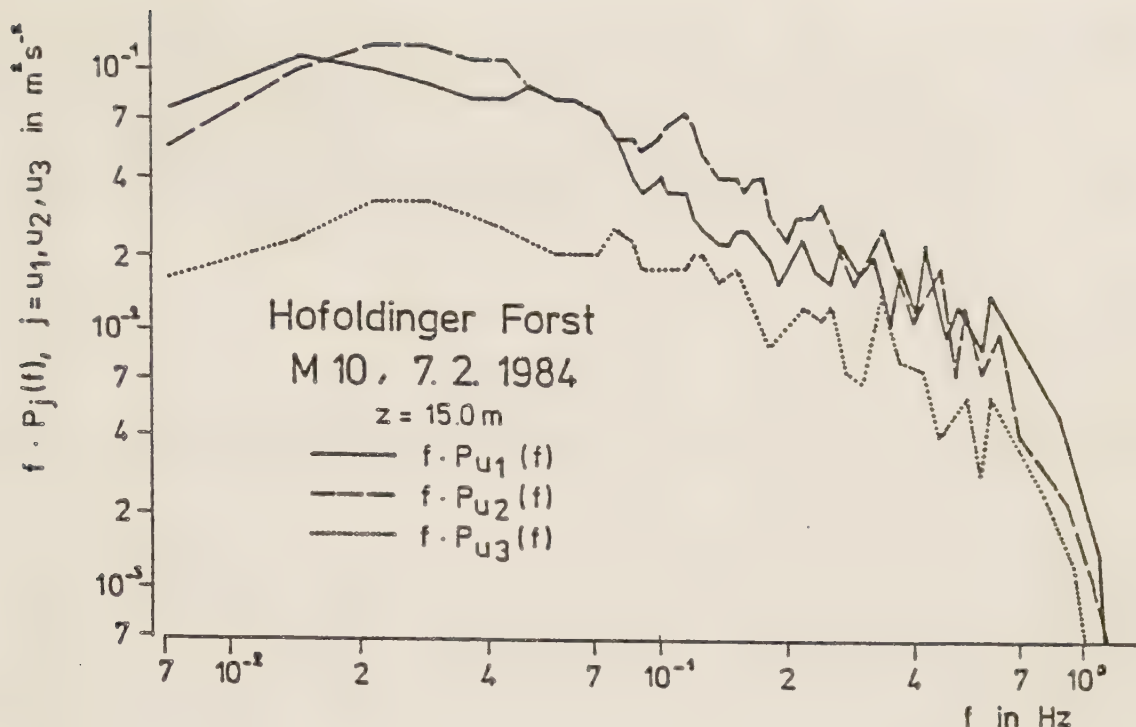


Abb. 33: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldingen Forst ( $z = 15.0$  m);  $f$ : Frequenz

Spektren im Bereich der Maxima wie auch im hochfrequenten Teil fest. Während letzteres für die Problematik windinduzierter Baumschwingungen weniger bedeutend ist, besitzen die Maxima und ihre zugehörigen Frequenzen eine höhere Relevanz. Die Lage der Maxima wird häufig als grobe Schätzung für die Größe der energieenthaltenden Wirbel verwendet (z.B. Hennemuth, 1978).

Die Frequenzen und Beträge der Spektrenmaxima sind, nach Versuchsflächen geordnet, für alle ausgewählten Meßserien in Tab. 14 bis Tab. 16 zusammengestellt. Die in Tab. 14 enthaltenen Maxima in 34.0 m Höhe, also knapp über der Bestandshöhe, nehmen beim vertikalen Windspektrum die geringsten und beim longitudinalen Windspektrum die größten Werte an. Die Beträge der Maxima der lateralen Spektren liegen zwischen diesen Werten. Mit Ausnahme des Meßlaufes M5 am 4.1.1984 liegen in dieser Höhe alle Maxima der  $u_1$ -Spektren bei geringeren Frequenzen als

Tab. 14: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $\text{Max}$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) der Sepktrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei ausgewählten Meßserien im Ebersberger Forst

|              |       | 34.0 m (Bot.) |                            | 24.0 m (Bot.) |                            | 34.0 m (Met.) |                            |
|--------------|-------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
|              |       | $f$           | $\text{Max}$               | $f$           | $\text{Max}$               | $f$           | $\text{Max}$               |
|              |       | in Hz         | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ | in Hz         | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ | in Hz         | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ |
| M1, 4.1.1984 | $u_1$ | 0.03          | 1.84                       | 0.04          | 0.72                       | 0.05          | 2.34                       |
|              | $u_2$ | 0.04          | 1.66                       | 0.04          | 0.84                       | 0.07          | 1.01                       |
|              | $u_3$ | 0.09          | 0.78                       | 0.05          | 0.60                       | 0.08          | 0.84                       |
| M3, 4.1.1984 | $u_1$ | 0.02          | 2.76                       | 0.07          | 0.51                       | 0.02          | 2.84                       |
|              | $u_2$ | 0.08          | 1.06                       | 0.04          | 0.84                       | 0.07          | 1.11                       |
|              | $u_3$ | 0.16          | 0.56                       | 0.04          | 0.21                       | 0.14          | 0.72                       |
| M4, 4.1.1984 | $u_1$ | 0.04          | 2.18                       | 0.09          | 0.30                       | 0.01          | 1.74                       |
|              | $u_2$ | 0.06          | 1.11                       | 0.04          | 0.35                       | 0.07          | 1.11                       |
|              | $u_3$ | 0.09          | 0.95                       | 0.06          | 0.27                       | 0.09          | 0.76                       |
| M5, 4.1.1984 | $u_1$ | 0.06          | 1.73                       | 0.06          | 0.53                       | 0.05          | 2.12                       |
|              | $u_2$ | 0.06          | 1.19                       | 0.04          | 0.72                       | 0.05          | 1.18                       |
|              | $u_3$ | 0.13          | 0.68                       | 0.05          | 0.40                       | 0.05          | 0.61                       |
| M8, 4.1.1984 | $u_1$ | 0.02          | 1.36                       | 0.05          | 0.33                       | 0.02          | 1.54                       |
|              | $u_2$ | 0.04          | 0.70                       | 0.03          | 0.57                       | 0.04          | 0.57                       |
|              | $u_3$ | 0.06          | 0.35                       | 0.02          | 0.23                       | 0.08          | 0.30                       |

die der  $u_3$ -Spektren. Auch hier liegen die Frequenzen der Maxima der  $u_2$ -Spektren zwischen den entsprechenden Frequenzen der Maxima der longitudinalen und vertikalen Spektren. Dies bestätigt die Anisotropie der Turbulenz an der Bestandshöhe eines Fichtenhochwaldes, was dadurch belegt wird, daß die Maxima des longitudinalen Spektrums bei kleineren Frequenzen liegen als die des lateralen bzw. vertikalen Windspektrums (Amtmann, 1982). Eine Verschiebung der Spektrenmaxima mit zunehmendem Betrag des mittleren Windvektors zu höheren Frequenzen hin konnte hier im Gegensatz zu den Ergebnissen von Allen (1968)

Tab. 15: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $Max$  (in  $m^2/s^2$ ) der Spektrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei ausgewählten Meßserien im Forstenrieder Park

|               |       | 3.7 m |              | 7.5 m |              | 15.0 m |              |
|---------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|--------|--------------|
|               |       | $f$   | $Max$        | $f$   | $Max$        | $f$    | $Max$        |
|               |       | in Hz | in $m^2/s^2$ | in Hz | in $m^2/s^2$ | in Hz  | in $m^2/s^2$ |
| M2, 31.1.1983 | $u_1$ | -. -  | -. -         | 0.02  | 0.97         | 0.01   | 1.09         |
|               | $u_2$ | -. -  | -. -         | 0.04  | 1.37         | 0.05   | 1.44         |
|               | $u_3$ | -. -  | -. -         | 0.04  | 0.81         | 0.04   | 0.78         |
| M3, 31.1.1983 | $u_1$ | -. -  | -. -         | 0.02  | 1.05         | 0.01   | 1.14         |
|               | $u_2$ | -. -  | -. -         | 0.04  | 1.10         | 0.09   | 0.88         |
|               | $u_3$ | -. -  | -. -         | 0.08  | 1.07         | 0.09   | 0.81         |
| M7, 31.1.1984 | $u_1$ | -. -  | -. -         | 0.02  | 0.54         | 0.01   | 0.65         |
|               | $u_2$ | -. -  | -. -         | 0.03  | 0.87         | 0.02   | 0.80         |
|               | $u_3$ | -. -  | -. -         | 0.04  | 0.45         | 0.04   | 0.48         |
| M2, 30.5.1984 | $u_1$ | 0.02  | 0.31         | 0.01  | 0.19         | 0.01   | 0.42         |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.32         | 0.01  | 0.27         | 0.01   | 0.36         |
|               | $u_3$ | 0.09  | 0.08         | 0.01  | 0.03         | 0.04   | 0.20         |
| M4, 30.5.1984 | $u_1$ | 0.01  | 0.43         | 0.01  | 0.32         | 0.01   | 0.46         |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.30         | 0.01  | 0.19         | 0.01   | 0.30         |
|               | $u_3$ | 0.14  | 0.05         | 0.01  | 0.08         | 0.04   | 0.16         |
| M7, 30.5.1984 | $u_1$ | 0.01  | 0.27         | 0.01  | 0.24         | 0.01   | 0.33         |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.40         | 0.01  | 0.26         | 0.01   | 0.40         |
|               | $u_3$ | 0.11  | 0.07         | 0.04  | 0.03         | 0.04   | 0.20         |

nicht festgestellt werden.

Für die Spektrenmaxima im Kronenraum ( $z = 24.0$  m) des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst kann man aus Tab. 14 entnehmen, daß die Maxima der  $u_2$ -Spektren bei nahezu den gleichen Frequenzen liegen wie die der  $u_3$ -Spektren, während die Maxima

Tab. 16: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $\text{Max}$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) der Spektrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei ausgewählten Meßserien im Hofoldinger Forst

|               |       | 3.7 m |                            | 7.5 m |                            | 15.0 m |                            |
|---------------|-------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|--------|----------------------------|
|               |       | $f$   | $\text{Max}$               | $f$   | $\text{Max}$               | $f$    | $\text{Max}$               |
|               |       | in Hz | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ | in Hz | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ | in Hz  | in $\text{m}^2/\text{s}^2$ |
| M6, 7.2.1984  | $u_1$ | 0.52  | 0.16                       | 0.31  | 0.25                       | 0.03   | 0.44                       |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.05                       | 0.03  | 0.13                       | 0.03   | 0.27                       |
|               | $u_3$ | 0.02  | 0.02                       | 0.03  | 0.02                       | 0.06   | 0.17                       |
| M9, 7.2.1984  | $u_1$ | 0.46  | 0.08                       | 0.26  | 0.07                       | 0.03   | 0.13                       |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.05                       | 0.01  | 0.06                       | 0.04   | 0.09                       |
|               | $u_3$ | 0.01  | 0.03                       | 0.01  | 0.02                       | 0.05   | 0.04                       |
| M10, 7.2.1984 | $u_1$ | 0.56  | 0.05                       | 0.41  | 0.07                       | 0.01   | 0.11                       |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.07                       | 0.01  | 0.12                       | 0.02   | 0.13                       |
|               | $u_3$ | 0.01  | 0.06                       | 0.02  | 0.03                       | 0.03   | 0.03                       |
| M2, 8.2.1984  | $u_1$ | 0.31  | 0.09                       | 0.53  | 0.08                       | 0.01   | 0.17                       |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.05                       | 0.01  | 0.14                       | 0.02   | 0.18                       |
|               | $u_3$ | 0.01  | 0.02                       | 0.01  | 0.05                       | 0.04   | 0.04                       |
| M4, 8.2.1984  | $u_1$ | 0.43  | 0.08                       | 0.39  | 0.09                       | 0.02   | 0.22                       |
|               | $u_2$ | 0.01  | 0.05                       | 0.01  | 0.09                       | 0.03   | 0.10                       |
|               | $u_3$ | 0.01  | 0.03                       | 0.03  | 0.01                       | 0.05   | 0.03                       |

der  $u_1$ -Spektren zumeist bei den höchsten Frequenzen auftreten. Im Gegensatz zur Bestandshöhe sind hier außerdem die Beträge der lateralen Spektrenmaxima größer als die der longitudinalen bzw. vertikalen. Mit Ausnahme der Meßserie M4 am 30.5.1984 tritt diese Tendenz auch bei den Meßläufen aus dem Forstenrieder Park in 3.7 m und 7.5 m Höhe auf (Tab. 15). Die Beträge der Spektrenmaxima in 15.0 m Höhe weisen hingegen keinen so eindeutigen Zusammenhang auf, wie er an der Bestandshöhe im Ebersberger Forst besteht. Zwar besitzen auch in 15.0 m Höhe im Forstenrieder Park die Maxima der  $u_3$ -Spektren im Vergleich

zu den Maxima der beiden horizontalen Spektren die geringsten Werte, aber es besteht kein solcher Zusammenhang zwischen den Maxima der  $u_1$ - und  $u_2$ -Spektren. Letzteres ist auch unter Einbeziehung der mittleren Windvektorbeträge aus Tab. 9 nicht zu erklären, da alle Messungen auf dieser Versuchsfläche bei nahezu den gleichen mittleren Windvektorbeträgen durchgeführt wurden.

Eine Besonderheit weisen die in Tab. 16 zusammengestellten Ergebnisse von den Meßserien aus dem Hofoldinger Forst auf. In den beiden unteren Höhen liegen die Maxima der  $u_1$ -Spektren bei Frequenzen zwischen 0.26 Hz und 0.56 Hz. Unabhängig von der Meßhöhe traten bei keinem der Meßläufe auf den anderen Versuchsflächen die Maxima der longitudinalen Spektren auch nur annähernd in diesem Frequenzbereich auf. Zudem kann man Abb. 31 und Abb. 32 entnehmen, daß in diesem Frequenzbereich noch einige Maxima mit teilweise fast dem gleichen Betrag vorkommen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Allen (1968), der seine Untersuchungen in einem 10.4 m hohen Bestand aus japanischen Lärchen (*Larix kaempferi*) durchgeführt hat, ergibt für das primäre Spektrenmaximum keine Übereinstimmung. Die Maxima seiner Spektren der horizontalen Windgeschwindigkeit liegen alle im Frequenzbereich zwischen  $0.04 \text{ Hz} \leq f \leq 0.10 \text{ Hz}$ . Im oberen Kronenraum und an der Bestandshöhe traten jedoch auch sekundäre Spektrenmaxima bei Frequenzen zwischen  $0.15 \text{ Hz} \leq f \leq 0.33 \text{ Hz}$  auf, die Allen (1968) auf lokale Wirbel zurückführte.

Dieses Auftreten lokaler Wirbel soll im folgenden auch für den Stammraum des Hofoldinger Forstes abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der nahen Bundesautobahn München - Salzburg kann man wegen des fehlenden Traufes dieses Bestandes eine Durchströmung im Stammraum nicht ausschließen. Betrachtet man weiterhin wegen der relativ geringen mittleren Windgeschwindigkeiten während der Meßserien die Baumstämme bis zu 7.5 m Höhe über dem Boden als einseitig eingespannte, starre Zylinder, so läßt sich mit Gl. (79) die Wirbelablösefrequenz im Lee der angeströmten Bäume berechnen. Aus Tab. 9 ergibt sich für

den Betrag des mittleren Windvektors im Mittel über die 5 Meßläufe und die 2 Meßhöhen ein Wert  $|\vec{u}| = 0.8 \text{ m/s}$ . Nimmt man für den Durchmesser des Baumes  $d = 0.3 \text{ m}$  an, was für diesen Bestand in 3.7 m Höhe ein typischer Wert ist, so ergibt sich mit  $St = 0.2$  eine Wirbelablösefrequenz  $f_{\text{wir}} = 0.5 \text{ Hz}$ . Im Rahmen der gemachten Annahmen, bei denen z.B. Interferenzerscheinungen oder der Einfluß der rauhen Rindenoberfläche auf die Strouhalzahl  $St$  nicht berücksichtigt sind, stimmt diese grobe Abschätzung gut mit den berechneten Spektralwerten überein. Es zeigt sich also, daß sogar schon bei geringen Windgeschwindigkeiten hinter Bestandsrändern ohne Trauf mit Durchströmung gerechnet werden muß, wobei im Strömungsfeld lokale Wirbel eingelagert sind.

## 7.5 Schubspannung

Die Windbelastung eines schwingenden, freistehenden Körpers bei horizontaler Anströmung kann analytisch durch Gl. (60) beschrieben werden. Wie aus Gl. (65) zu entnehmen ist, ist das Spektrum  $P_F(f)$  der Windkraft  $F$  mit dem longitudinalen Windspektrum  $P_{u_1}(f)$  u.a. über den Widerstandsbeiwert  $c_d$  und die Fläche  $A$  senkrecht zur Strömungsrichtung verknüpft. Die Anwendung dieser Gleichung auf schwingende Bäume im Bestand scheidet aber hier aus, weil im allgemeinen eine horizontale Anströmung des Einzelbaumes, wie bei Gl. (60) vorausgesetzt wurde, nicht mehr gegeben ist. Außerdem sind die benötigten Momentanwerte von  $c_d$  und  $A$  für die jeweils untersuchten Bäume auf den Versuchsflächen kaum verfügbar. Deshalb wurde in dieser Arbeit analog zu Holbo et al., (1978; 1980) die aus den Windmessungen berechnete Schubspannung als Maß für die wirkende Windkraft verwendet.

Als Schubspannungen werden die Tangentialspannungen des turbulenten Spannungstensors  $\overline{T_{ik}}$  bezeichnet. Neben diesen Tangentialspannungen enthält  $\overline{T_{ik}}$  noch Normalspannungen oder Drücke und läßt sich in sehr guter Näherung durch Gl. (99) darstellen (z.B. Kraus, 1970):

Tab. 17: Mittelwert Mit (in N/m<sup>2</sup>), Varianz  $\sigma^2$  (in N<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der Schubspannungen in 3 Höhen bei allen ausgewählten Meßserien

|               | Höhe1                   |                                              |       |       | Höhe2                   |                                              |       |       | Höhe3                   |                                              |       |       |
|---------------|-------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|
|               | Mit<br>N/m <sup>2</sup> | $\sigma^2$<br>N <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> | S     | K     | Mit<br>N/m <sup>2</sup> | $\sigma^2$<br>N <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> | S     | K     | Mit<br>N/m <sup>2</sup> | $\sigma^2$<br>N <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> | S     | K     |
| M2, 31.1.1983 | -.-                     | -.-                                          | -.-   | -.-   | 0.35                    | 17.21                                        | 0.75  | 7.04  | 1.22                    | 11.78                                        | 1.69  | 8.15  |
| M3, 31.1.1983 | -.-                     | -.-                                          | -.-   | -.-   | 0.42                    | 26.75                                        | 0.51  | 11.46 | 1.33                    | 16.88                                        | 1.66  | 9.30  |
| M7, 31.1.1983 | -.-                     | -.-                                          | -.-   | -.-   | 0.12                    | 6.16                                         | 0.95  | 10.76 | 0.49                    | 4.49                                         | 1.44  | 9.27  |
| M1, 4.1.1984  | 2.14                    | 18.07                                        | 3.54  | 25.68 | 0.14                    | 1.17                                         | 0.85  | 12.20 | 2.02                    | 16.38                                        | 2.40  | 14.13 |
| M3, 4.1.1984  | 2.30                    | 20.67                                        | 3.07  | 18.91 | 0.16                    | 1.57                                         | 2.27  | 15.04 | 2.11                    | 18.77                                        | 2.11  | 11.06 |
| M4, 4.1.1984  | 2.04                    | 24.18                                        | 3.83  | 31.06 | 0.08                    | 1.29                                         | 10.27 | 24.25 | 1.84                    | 16.46                                        | 2.50  | 15.92 |
| M5, 4.1.1984  | 2.01                    | 16.32                                        | 2.93  | 14.68 | 0.08                    | 1.40                                         | 0.05  | 19.91 | 1.84                    | 14.26                                        | 2.48  | 13.17 |
| M8, 4.1.1984  | 1.27                    | 7.38                                         | 3.64  | 23.01 | -0.03                   | 6.89                                         | 1.65  | 17.37 | 1.01                    | 6.07                                         | 3.74  | 30.40 |
| M6, 7.2.1984  | -0.10                   | 0.10                                         | -6.02 | 56.94 | -0.21                   | 0.37                                         | -5.04 | 39.48 | -0.20                   | 1.03                                         | -2.10 | 28.36 |
| M9, 7.2.1984  | -0.10                   | 0.08                                         | 2.57  | 90.99 | -0.07                   | 0.06                                         | -5.68 | 65.07 | -0.12                   | 0.68                                         | -2.43 | 22.64 |
| M10, 7.2.1984 | -0.09                   | 0.11                                         | -3.95 | 33.37 | -0.11                   | 0.08                                         | -2.01 | 24.94 | -0.13                   | 0.10                                         | -3.27 | 48.08 |
| M2, 8.2.1984  | -0.07                   | 0.03                                         | -5.53 | 67.21 | -0.18                   | 0.30                                         | -6.11 | 59.67 | -0.09                   | 0.14                                         | -3.09 | 31.69 |
| M4, 8.2.1984  | -0.08                   | 0.03                                         | -2.63 | 9.83  | -0.11                   | 0.06                                         | -5.03 | 43.67 | -0.12                   | 0.16                                         | -5.90 | 55.70 |
| M2, 30.5.1984 | 0.04                    | 0.02                                         | 0.36  | 6.75  | 0.03                    | 0.01                                         | -2.75 | 31.72 | 0.13                    | 0.09                                         | 1.53  | 29.83 |
| M4, 30.5.1984 | -0.01                   | 0.02                                         | -0.24 | 5.68  | 0.01                    | 0.03                                         | -1.24 | 7.33  | 0.20                    | 0.08                                         | 0.37  | 8.77  |
| M7, 30.5.1984 | 0.03                    | 0.03                                         | 0.40  | 13.11 | -0.02                   | 0.01                                         | -3.83 | 40.53 | 0.29                    | 0.11                                         | 2.46  | 17.29 |

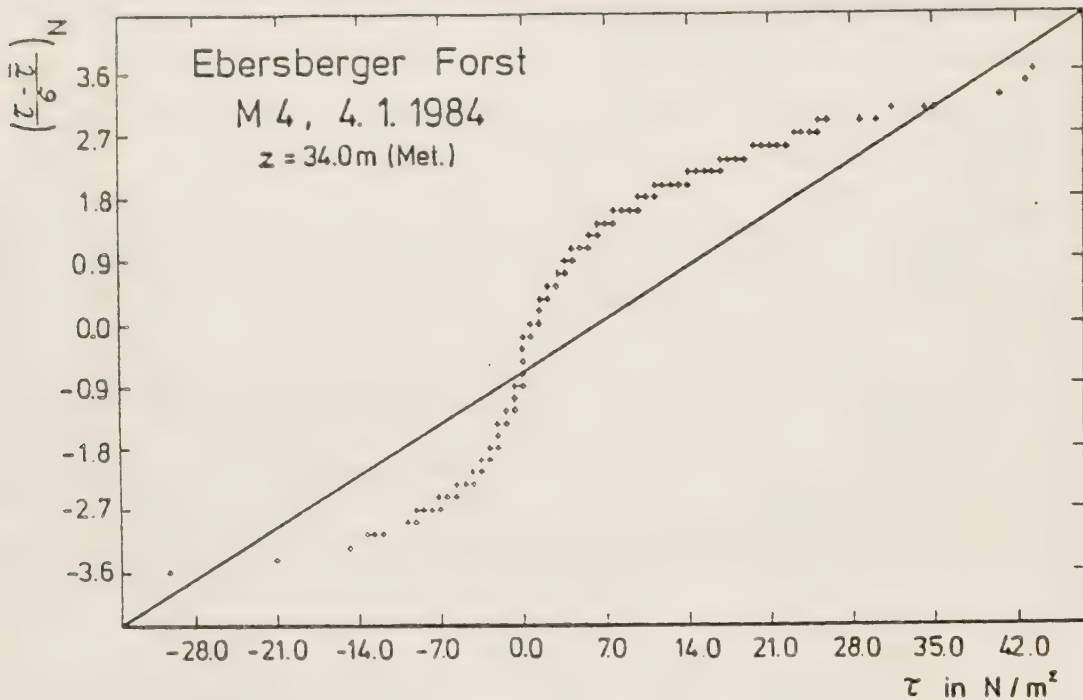


Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  bei der Meßserie M4 am 4.1.1984 knapp über der Bestandshöhe ( $z=34.0$  m) des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst (Meßstelle: Meteorologenturm); die durchgezogene Linie entspricht einer Gaußschen Normalverteilung

$$\overline{T_{ik}} = - \overline{\rho_1 \cdot u'_k u'_i} \quad , \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (99)$$

Hierin bezeichnen  $\overline{\rho_1}$  das zeitliche Mittel der Luftdichte und  $u'_i$ ,  $i=1,2,3$  und  $u'_k$ ,  $k=1,2,3$  die Schwankungsanteile der Windvektorkomponenten. Im vorliegenden strömungsorientierten Koordinatensystem bleibt unter der Annahme von horizontaler Homogenität von den turbulenten Schubspannungen im wesentlichen nur noch diejenige übrig, die in longitudinaler Richtung auf eine horizontale Fläche wirkt (Kraus, 1970). Gleichzeitig ist dies der turbulente vertikale Strom des Impulses in  $x_1$ -Richtung, für den aus Gl. (99) folgt (z.B. Lumley und Panofsky, 1964):

$$\overline{\tau} = \overline{T_{13}} = - \overline{\rho_1 \cdot u'_1 u'_3} \quad (100)$$

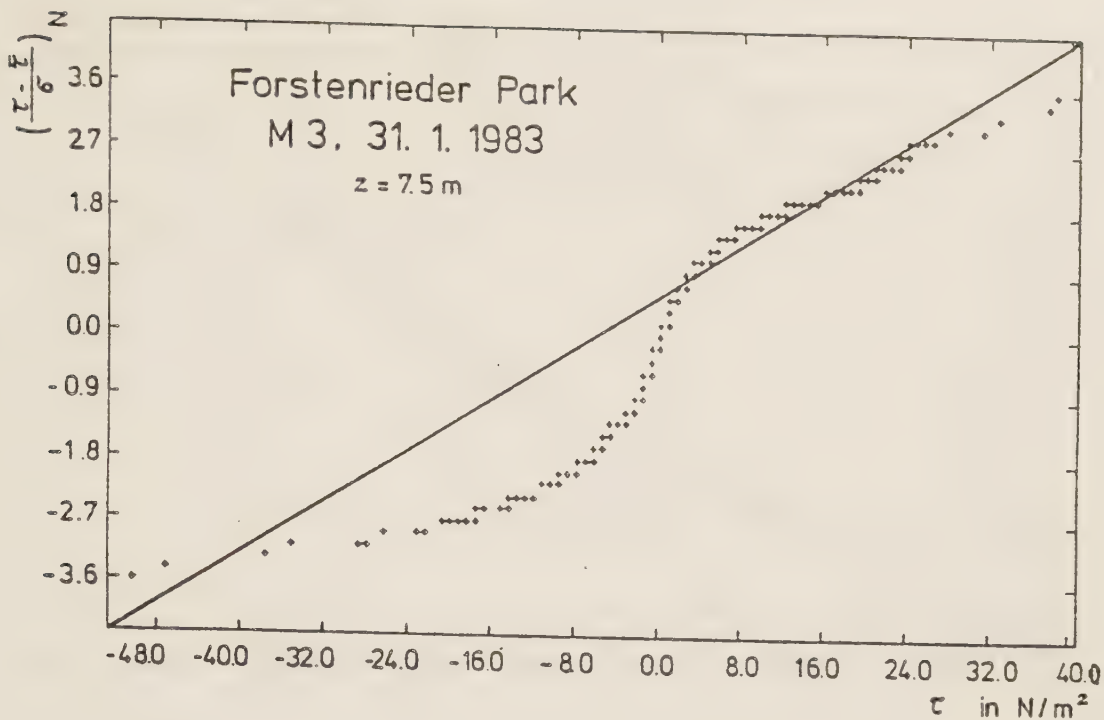


Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  bei der Meßserie M3 am 31.1.1983 am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park ( $z=7.5$  m); die durchgezogene Linie entspricht einer Gaußschen Normalverteilung

Zur Charakterisierung der Schubspannungsverhältnisse bei den ausgewählten Meßserien dienen die Ergebnisse in Tab. 17. In ihr sind für jeden ausgewählten Meßlauf und jede Meßhöhe der Mittelwert und die Zentralmomente 2. - 4. Ordnung zusammengestellt. Die hohen Mittelwerte der Schubspannungen bestätigen die intensive Windturbulenz an der Bestandshöhe eines Fichtenhochwaldes (z.B. Baumgartner, 1971; Mayer, 1981). Zusätzlich belegen die sehr hohen Werte der Kurtosis  $K$  und der Schiefe  $S$ , daß die Verteilung der Schubspannung  $\tau$  schiefer als eine Normalverteilung und sehr viel spitzer ist. Dies stimmt mit den Ergebnissen anderer Autoren grundsätzlich überein (z.B. MacBean, 1974; Hennemuth, 1978). So erhielt Hennemuth (1978) aus Messungen in 0.6 m Höhe über ca. 0.2 m hohem Raps für die Schiefe  $S=-0.97$  und für die Kurtosis  $K=6.13$ .

Die hier erläuterten Eigenschaften erkennt man natürlich auch

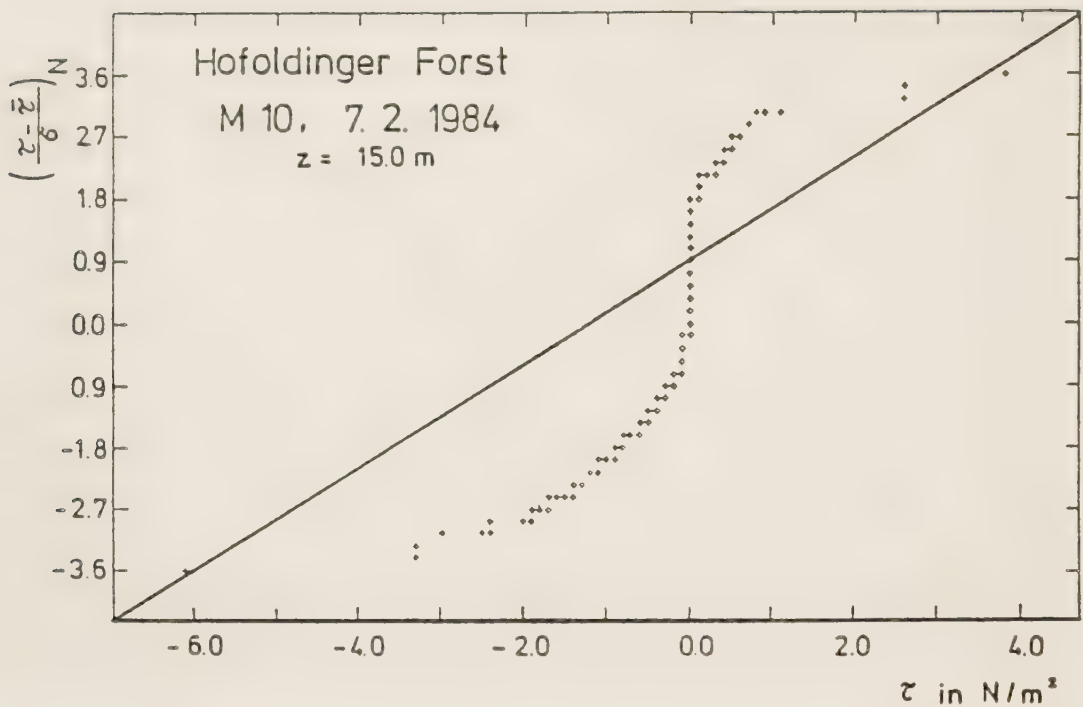


Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  bei der Meßserie M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldinger Forst ( $z=15.0$  m); die durchgezogene Linie entspricht einer Gaußschen Normalverteilung

in den Häufigkeitsverteilungen der Schubspannung. So sind in Abb. 34 bis Abb. 36 von jeder Versuchsfläche die tatsächlichen Schubspannungen  $\tau$  in unterschiedlichen Höhen gegen die hypothetisch normalverteilten Schubspannungen  $((\tau - \bar{\tau})/\sigma)_N$  aufgetragen. Bei dieser Darstellungsart würden bei einer Gaußschen Normalverteilung der tatsächlichen Schubspannungen  $\tau$  alle Werte auf der eingezeichneten Diagonalen liegen. Aus den in Abb. 34 bis Abb. 36 dargestellten Kurvenverläufen kann man entnehmen, daß jeweils der Mittelwert größer als der Median ist, wobei der häufigste Wert (Mode) mit keiner dieser beiden Größen zusammenfällt. Im Ebersberger und im Hofoldinger Forst kommen kleine negative Abweichungen vom Mittelwert zu selten und kleine positive Abweichungen zu häufig vor. Große Abweichungen vom Mittelwert treten nahezu genauso häufig auf wie bei einer idealen Gaußschen Normalverteilung. Besonders wird auf die in

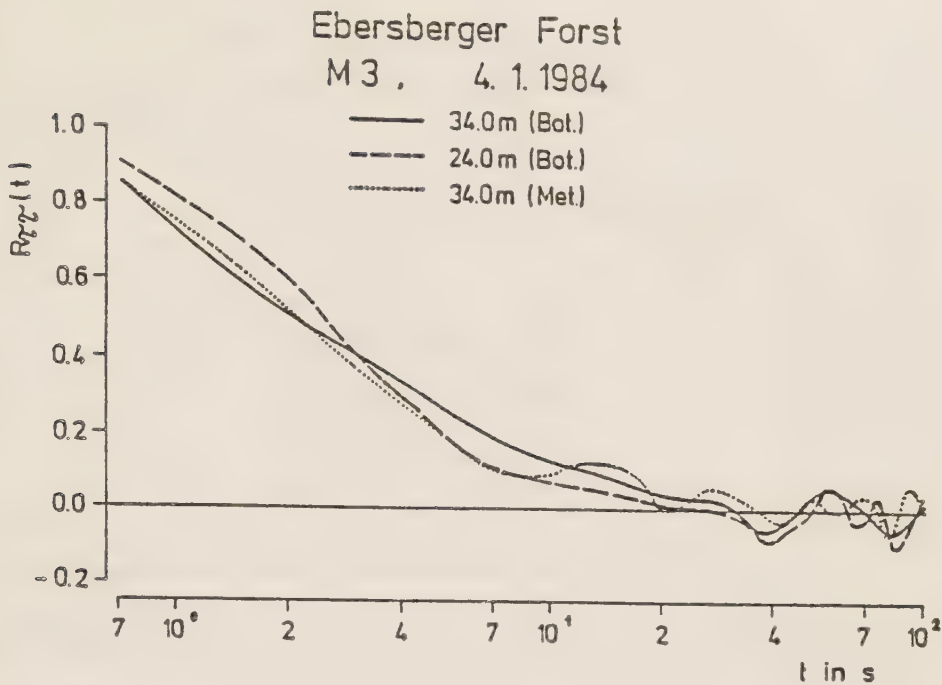


Abb. 37: Autokorrelationsfunktionen  $R_{\tau\tau}(t)$  der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 im Ebersberger Forst in 3 Höhen

Abb. 35 dargestellte Verteilung des Meßlaufes M3 vom 31.1.1984 im Forstenrieder Park hingewiesen, bei der nur die kleinen negativen Abweichungen entsprechend einer Gaußschen Normalverteilung auftreten.

Bei der Berechnung von Spektren aus endlichen, äquidistanten Zeitreihen wird häufig Stationarität und Ergodizität vorausgesetzt. Diese beiden Eigenschaften sind sehr einfach über den Verlauf der Korrelationsfunktionen mit Gl. (20 a, b) zu überprüfen. Ist nämlich eine Zeitreihe instationär, was beim Auftreten einer Trends der Fall ist, so wird dadurch der niederfrequente Bereich der Spektren verfälscht.

In Abb. 37 bis Abb. 39 ist anhand von 3 Meßserien auf unterschiedlichen Versuchsflächen der typische Verlauf der Autokorrelationsfunktionen in verschiedenen Höhen wiedergegeben. Prinzipiell besitzen alle Autokorrelationsfunktionen ihre er-

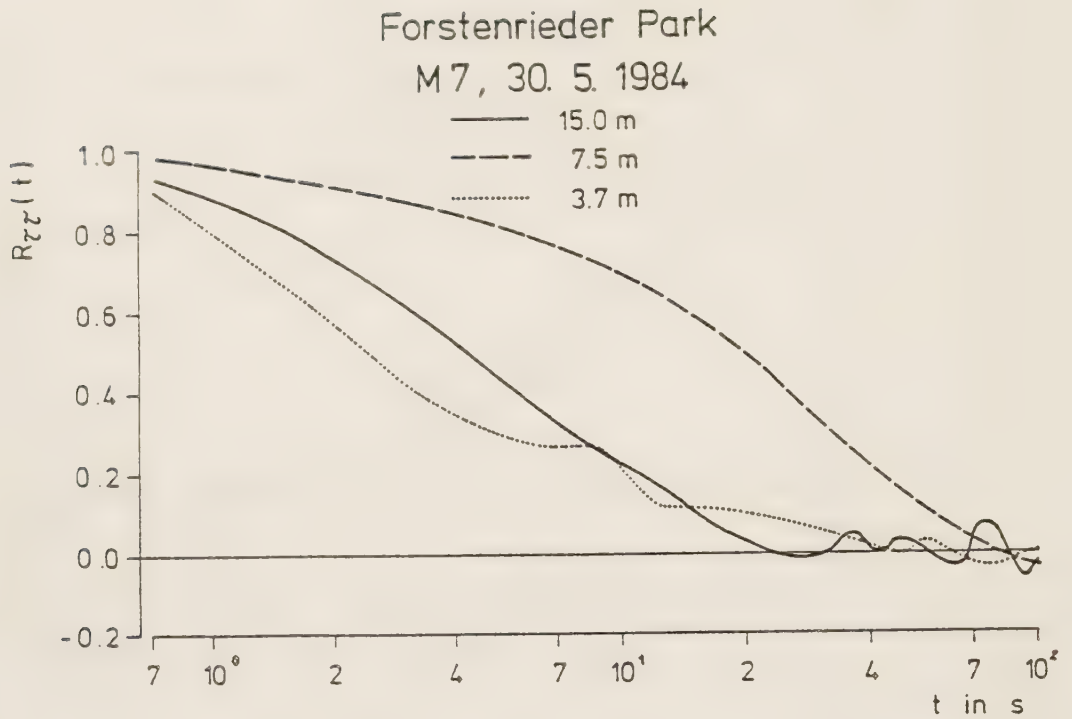


Abb. 38: Autokorrelationsfunktionen  $R_{\tau\tau}(t)$  der Schubspannungsfuktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M7 am 30.5.1984 im Forstenrieder Park in 3 Höhen

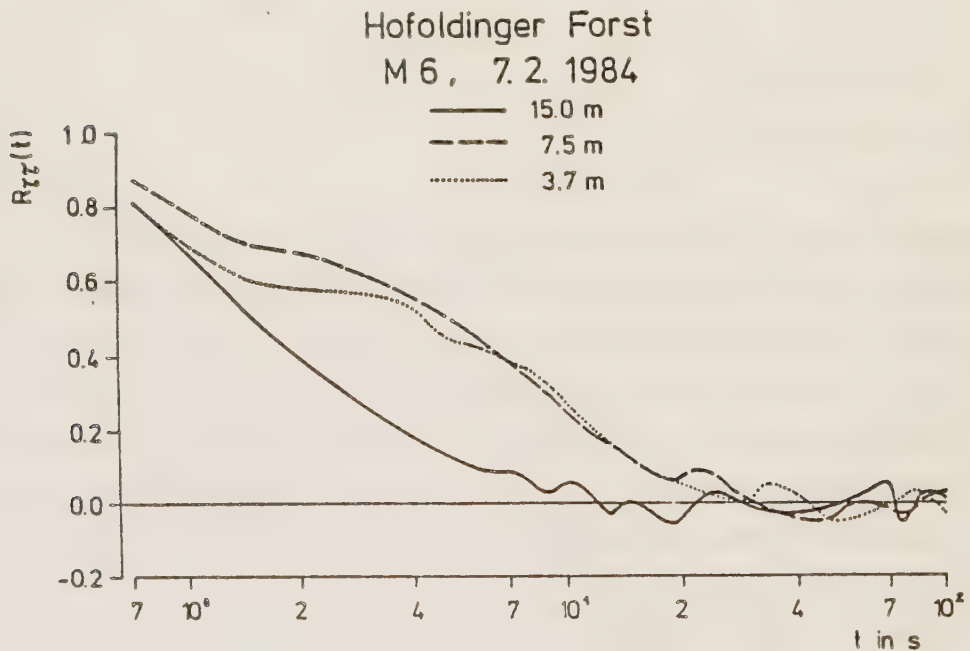


Abb. 39: Autokorrelationsfunktionen  $R_{\tau\tau}(t)$  der Schubspannungsfuktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M6 am 7.2.1984 im Hofoldinginger Forst in 3 Höhen

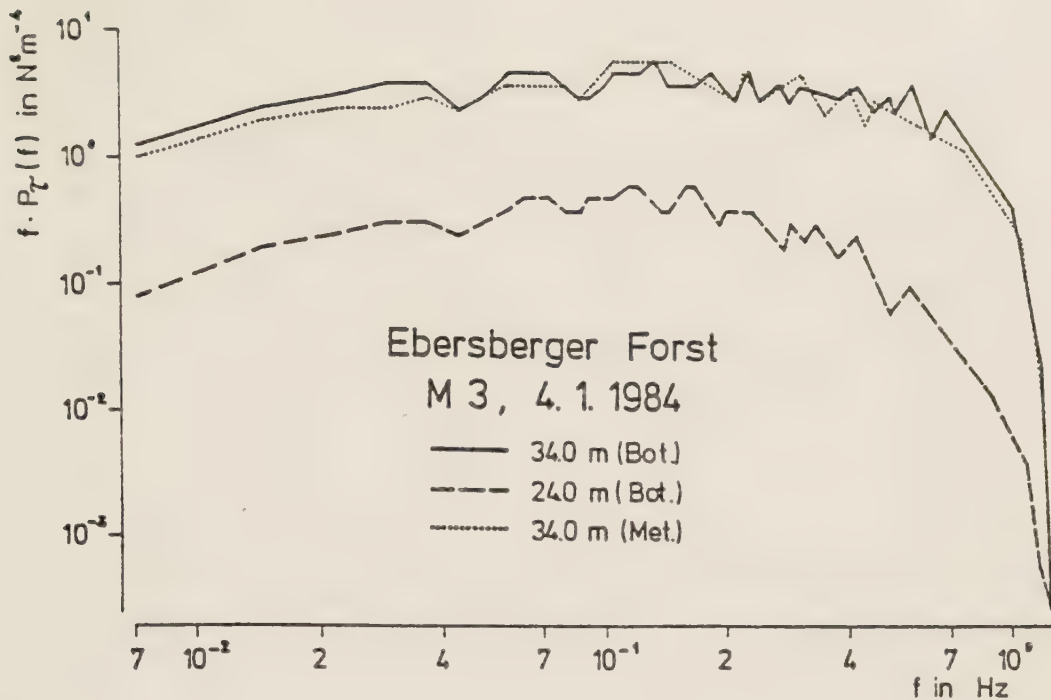


Abb. 40: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 im Ebersberger Forst in 3 Höhen

ste Nullstelle bei Zeiten zwischen 10 s und 40 s, wobei als einzige Ausnahme beim Meßlauf M7 am 30.5.1984  $R_{\tau\tau}(t)$  in 7.5 m die erste Nullstelle bei einer Zeit um 70 s hat (Abb. 38). Multipliziert man diese Zeiten mit der Scanrate von 2.5 Hz, so ergeben sich die Nullstellen als Funktion der Verschiebungszahl. 10 s entsprechen dann einer Verschiebungszahl  $k=25$  und 40 s entsprechen  $k=100$ . Unter Einbeziehung der mittleren Windvektorbeträge aus Tab. 9 zeigt sich, daß bei jedem Meßlauf die Autokorrelationsfunktion  $R_{\tau\tau}(t)$  den ersten Nulldurchgang in der Höhe aufweist, in der der größte Windvektorbetrag gemessen wurde. Diese Höhen sind gleichzeitig bei jeder Meßserie die obersten Meßhöhen, was aufgrund der in Abschnitt 3.1 angegebenen Gleichungen für das vertikale Windprofil in und über dem Bestand zu erwarten war. Die in Abb. 37 dargestellten Autokorrelationsfunktionen für den Meßlauf M3 am 4.1.1984 zeigen jedoch ebenso, daß an der Bestandshöhe des Fichtenhochwaldes auch die Autokorrelationsfunktion auftritt, die ihren ersten Nulldurchgang bei der größten Anzahl der Verschiebungen hat. Somit

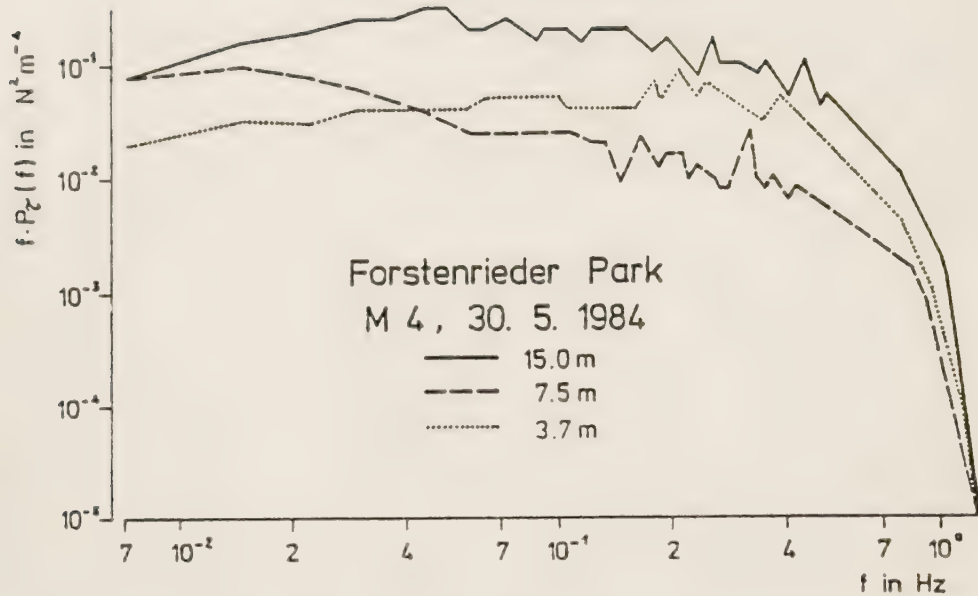


Abb. 41: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M4 am 30.5.1984 im Forstenrieder Park in 3 Höhen

kann davon ausgegangen werden, daß zumindest an der Bestands-  
höhe des Fichtenhochwaldes die erste Nullstelle von  $R_{\tau\tau}(t)$   
nicht nur vom Betrag des mittleren Windvektors, sondern auch  
von den lokalen Umgebungsverhältnissen beeinflusst wird.

Analysiert man nun die Fouriertransformierten der Autokorrela-  
tionsfunktionen, d.h. die Spektren der Schubspannungsfluktu-  
ationen, so kommt man aufgrund von Abb. 40 bis Abb. 42 zu fol-  
genden Ergebnissen: Knapp über der Bestandshöhe eines Fichten-  
waldes im Ebersberger Forst nehmen die spektralen Varianzan-  
teile von  $\tau'$  zwischen  $0.01 \text{ Hz} \leq f \leq 0.08 \text{ Hz}$  geringfügig zu,  
bleiben dann bis  $f \approx 0.6 \text{ Hz}$  nahezu konstant und werden dann bei  
Frequenzen  $f > 0.6 \text{ Hz}$  rasch kleiner. Durch die im Bereich  $f > 0.1$   
Hz in den Darstellungen durchgeführte Zusammenfassung der ein-  
zelnen Spektralwerte erhalten die Spektren einen relativ  
gleichmäßigen Verlauf.

Weiterhin belegen die Schubspannungsspektren aus dem Ebersber-

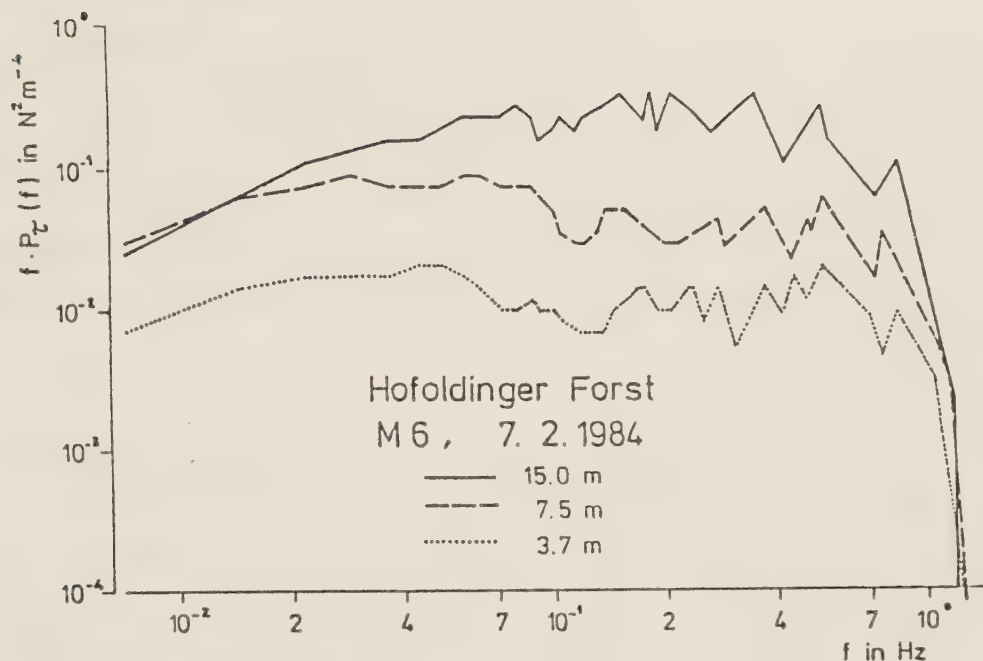


Abb. 42: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M6 am 7.2.1984 im Hofoldinginger Forst in 3 Höhen

ger und Hofoldinginger Forst eine Zunahme der Varianzanteile mit zunehmender Meßhöhe. Beim Ebersberger Forst bestätigen dies auch die Ergebnisse für die Gesamtvarianzen in Tab. 17, während im Hofoldinginger Forst die Varianzen aus 3.7 m und 7.5 m Höhe ungefähr dieselbe Größenordnung besitzen und zumeist geringer als die aus 15.0 m sind. Im Vergleich dazu sind die Schubspannungsvarianzen aus dem Kronenraum und knapp über dem Bestand im Ebersberger Forst größer, wobei die maximalen Werte an der Bestandshöhe auftreten. Bei den Meßläufen am 31.1.1983 im Forstenrieder Park sind dagegen die Varianzen in 7.5 m Höhe größer als diejenigen in 15.0 m Höhe. Außerdem liegen sie in der Größenordnung der Schubspannungsvarianzen, die an der Bestandshöhe im Ebersberger Forst ermittelt wurden.

Vernachlässigt man die Varianzen bei den Meßserien am 31.1.1983, so zeigt ein Vergleich mit den restlichen Meßläufen, daß die Varianzen der Schubspannung an der Bestandshöhe ungefähr den 10-fachen Betrag wie im Kronenraum und nahezu den 100-fachen

Betrag wie im oberen Stammraum in 15.0 m Höhe besitzen. Obwohl die Messungen in 15.0 m und 34.0 m Höhe bei unterschiedlichen Wetterlagen und auf verschiedenen Versuchsflächen durchgeführt wurden, stimmt dies gut mit den Ergebnissen von Holbo et al. (1980) überein. Sie beobachteten ferner über einem Douglasienbestand eine Zunahme der Schubspannungsvarianzen um den Faktor 50, wenn sich die horizontalen Windgeschwindigkeiten verdreifachten.

Im Hinblick auf die Bedeutung für windinduzierte Baumschwingungen lassen sich die Ergebnisse für die Schubspannung wie folgt zusammenfassen: Sowohl die Mittelwerte  $\bar{\tau}$  wie auch die Varianzen  $\sigma_{\tau}^2$  nehmen zur Bestandshöhe hin zu. Dies hat zur Folge, daß auch die Maxima der Schubspannungsspektren an der Bestandshöhe größere Werte annehmen als z.B. im Kronenraum. In dem für die vorliegende Problematik interessanten Frequenzbereich zwischen  $0.1 \text{ Hz} \leq f \leq 1.0 \text{ Hz}$  zeigen die Schubspannungsspektren mehrere Maxima, die relativ dicht nebeneinander liegen und nicht durch deutliche 'gaps' voneinander getrennt sind. Im Gegensatz zu den Spektren der Windvektorkomponenten kann im allgemeinen kein vorherrschendes Maximum ermittelt werden. Mit zunehmenden Beträgen des mittleren Windvektors nimmt auch die Schubspannung zu, was gleichzeitig bei einem Einzelbaum auch eine höhere dynamische Belastung durch den Wind hervorruft.

## 8 Baumschwingungsmessungen

Die dynamische Windbelastung äußert sich bei Bäumen zunächst in der Form von Biegeschwingungen, die qualitativ schon wiederholt beschrieben wurden (z.B. Mitscherlich, 1981; Mayer, 1985). Zur Quantifizierung des Schwingungsverhaltens von Bäumen wurden deshalb an ausgewählten Bäumen in mehreren Höhen die Auslenkungen des Stammes aus der Vertikalen ermittelt. Diese Untersuchungen werden im folgenden näher diskutiert.

### 8.1 Charakterisierung der Versuchsbäume

Für die Untersuchungen wurden auf jeder Versuchsfläche 2 Bäume ausgewählt, so daß im gesamten 1 Kiefer (*Pinus sylvestris*) und 5 Fichten (*Picea abies*) für die Messungen zur Verfügung standen. Es wäre wünschenswert gewesen, die beiden Baumarten durch die gleiche Anzahl von Probestämmen zu repräsentieren, was jedoch aus technischen Gründen nicht durchführbar war. Somit beschränken sich die Aussagen hauptsächlich auf die Baumart Fichte (*Picea abies*), die in der Umgebung Münchens am weite-

Tab. 18: Charakteristische Abmessungen der Versuchsbäume auf den Meßflächen im Forstenrieder Park (F), Hofoldinger Forst (H) und Ebersberger Forst (E); Fi: Fichte, Ki: Kiefer, h: Baumhöhe,  $d_{1.3}$ : Brusthöhendurchmesser,  $h_a$ : Kronenansatzhöhe,  $l_b$ : maximale Kronenbreite

| Baum-<br>nr. | Ort | Baum-<br>art | h<br>in m | $d_{1.3}$<br>in m | $h_a$<br>in m | $l_b$<br>in m |
|--------------|-----|--------------|-----------|-------------------|---------------|---------------|
| 1            | F   | Fi           | 26.5      | 0.393             | 17.0          | 4.17          |
| 7            | F   | Fi           | 27.0      | 0.350             | 14.8          | 4.54          |
| 11           | H   | Ki           | 20.0      | 0.264             | 14.0          | 4.12          |
| 12           | H   | Fi           | 22.0      | 0.274             | 10.5          | 3.84          |
| 30           | E   | Fi           | 32.7      | 0.413             | 17.7          | 5.06          |
| 31           | E   | Fi           | 34.9      | 0.432             | 21.2          | 5.24          |

sten verbreitet ist.

Die charakteristischen oberirdischen Abmessungen der Versuchsbäume sind in Tab. 18 zusammengestellt. Die Baumhöhen  $h$  und die Kronenansatzhöhen  $h_a$  wurden mit dem Höhenmesser von Blume-Leiss, der Brusthöhendurchmesser  $d_{1.3}$  mit einem Umfangmeßband und die maximale Kronenbreite  $l_b$  mit einem Dachlot bestimmt. Die maximale Kronenbreite wurde über die Messung der Kronenradien in 8 verschiedenen Himmelsrichtungen mit einer Winkeldifferenz von  $45^\circ$  und anschließende Mittelbildung berechnet. Die Höhenmessungen wurden pro Baum mehrmals durchgeführt und anschließend gemittelt, um die Meßungenauigkeiten zu minimieren.

Mit den Werten aus Tab. 18 lassen sich nun einfache Kenngrößen der oberirdischen Baumorgane wie Baumvolumen  $v$ , Baummasse  $m$  und Projektionsfläche  $A$  der Baumkrone senkrecht zur horizontalen Anströmungsrichtung errechnen. Diese Maßzahlen sind für jeden Versuchsbaum in Tab. 19 aufgeführt, wobei das Baumvolumen mit drei verschiedenen Methoden ermittelt wurde. Der Mittelwert  $\hat{v}$  der bestimmten Baumvolumina wurde mit der Rohdichte  $\rho_r$  des lufttrockenen Holzes der jeweiligen Baumart multipli-

Tab. 19: Baumvolumina  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  und  $\hat{v}$  ( $\hat{v} = \frac{1}{3} \cdot (v_1 + v_2 + v_3)$ ), Baummasse  $m$  und Projektionsfläche  $A$  der Baumkrone senkrecht zur horizontalen Anströmungsrichtung der Versuchsbäume

| Baum-<br>nr. | $v_1$<br>in $m^3$ | $v_2$<br>in $m^3$ | $v_3$<br>in $m^3$ | $\hat{v}$<br>in $m^3$ | $m$<br>in kg | $A$<br>in $m^2$ |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| 1            | 1.514             | 1.483             | 1.446             | 1.481                 | 681.3        | 27.7            |
| 7            | 1.225             | 1.241             | 1.169             | 1.212                 | 557.5        | 38.8            |
| 11           | 0.446             | 0.503             | 0.526             | 0.492                 | 250.9        | 21.0            |
| 12           | 0.723             | 0.631             | 0.584             | 0.646                 | 297.2        | 30.9            |
| 30           | 1.742             | 2.030             | 1.981             | 1.918                 | 882.3        | 53.1            |
| 31           | 1.927             | 2.366             | 2.344             | 2.212                 | 1017.5       | 50.3            |

ziert, um die Baummasse  $m$  zu erhalten. Die mittleren Rohdichten für Fichten- bzw. Kiefernholz wurden aus Tab. 4 entnommen. Die Kronenfläche  $A$  wurde mit Gl. (54) berechnet, wobei für die Fichte (*Picea abies*)  $f'_k=0.70$  und für die Kiefer (*Pinus sylvestris*)  $f'_k=0.85$  verwendet wurde. In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß die formelhafte Berechnung der Kronenfläche immer nur eine grobe Näherung der tatsächlichen Kronenfläche ergeben kann. Die wichtigsten Ursachen dafür sind die unzureichende formelmäßige Beschreibung der Kronenform, die Unregelmäßigkeiten der Baumkronen selbst und die nie ganz auszuschaltenden Meßfehler.

Im Gegensatz zu der Kronenprojektionsfläche  $A$  können die Baumvolumina relativ genau abgeschätzt werden, wobei jedoch auch hier die Einschränkung besteht, daß eine genaue ertragskundliche Aufnahme eines Einzelbaumes nur am liegenden Baum erfolgen kann. Eine erste Abschätzung des Baumvolumens erhält man bei bekannter Brusthöhenformzahl  $f_{1.3}$  mit Gl. (51) aus dem Brusthöhendurchmesser  $d_{1.3}$  und der Baumhöhe  $h$ . Das so ermittelte Baumvolumen ist in Tab. 19 mit  $v_3$  bezeichnet. Für die Baumart Fichte (*Picea abies*) wurde dabei  $f_{1.3}=0.45$  und für die Baumart Kiefer (*Pinus sylvestris*)  $f_{1.3}=0.48$  angenommen (Mitscherlich, 1981). Die Ausbildung der Baumschäfte, und damit auch die Formzahlen sind u.a. stark von den jeweiligen Standorten abhängig. Um dies zu berücksichtigen wurden die Baumvolumina, die in Tab. 19 mit  $v_2$  bezeichnet sind, auch mit der Massentafel von Franz (1971) ermittelt, da sie basierend auf Probestämmen aus Bayern erstellt wurde. Aus dieser Massentafel erhält man die Volumenangaben in Vorratsfestmeter ( $V_{fm}$ ) Derbholz, wobei für die hier benötigten Abschätzungen  $V_{fm}$  mit  $m^3$  gleich gesetzt wurde. Nach Assmann (1961) versteht man unter Derbholz die oberirdischen Baumteile mit einem Minstdurchmesser von 7 cm, d.h. in den Volumina  $v_2$  ist das oberirdische Holz von Zweigen, Ästen und vom Stamm, welches einen geringeren Durchmesser als 7 cm besitzt, nicht enthalten.

Bei der Anwendung auf Einzelbäume sind diese beiden Verfahren

zur Bestimmung der Baumvolumina sehr kritisch zu bewerten, so daß aufgrund der in den Höhen der Beschleunigungsaufnehmer gemessenen Stammdurchmesser eine dritte Abschätzung der Baumvolumina durchgeführt wurde. Leider lagen die Stammdurchmesser nur in 4 Höhen vor, so daß auch die so ermittelten Baumvolumina  $v_1$  nicht als fehlerfrei anzusehen sind. Außerdem entspricht das Volumen  $v_1$  eines Einzelbaumes dem Volumen seines Schaftholzes, also des Holzes des durchgehenden Baumschaftes ohne Rücksicht auf die Durchmessergröße bis zur Endknospe. Am Beispiel der beiden Bäume Nr. 30 und Nr. 31 aus dem Ebersberger Forst zeigt sich deshalb deutlich, daß gerade bei älteren Nadelbäumen das Astderbholz bei Volumenberechnungen nicht vernachlässigt werden darf.

Mit den Angaben aus Tab. 18 und Tab. 19 kann man nun einige einfache Größen abschätzen, die das mechanische Verhalten eines Baumes beschreiben. Dazu wird der Baum als einseitig eingespannter, kreiszylindrischer Stab betrachtet. Aus dem Mittelwert  $\hat{v}$  der abgeschätzten Baumvolumina und der Baumhöhe  $h$

Tab. 20: Durchmesser des Bezugszylinders  $d_{Wal}$ , kritische Kraft  $F_{kr}$  und nach verschiedenen Methoden bestimmte kritische horizontale Windgeschwindigkeiten  $u_h^{St}$  und  $u_h^{Fr}$  sowie theoretisch bestimmte Frequenzen der Grundschiwingung  $f_1^{DGL}$  und  $f_1^{MAY}$ ; nähere Erläuterungen im Text

| Baum-<br>nr. | $d_{Wal}$<br>in m | $F_{kr}$<br>in N | $u_h^{St}$<br>in m/s | $u_h^{Fr}$<br>in m/s | $f_1^{DGL}$<br>in Hz | $f_1^{MAY}$<br>in Hz |
|--------------|-------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1            | 0.265             | 9177.5           | 32.1                 | 31.2                 | 0.256                | 0.290                |
| 7            | 0.239             | 5849.2           | 21.6                 | 25.2                 | 0.222                | 0.253                |
| 11           | 0.177             | 3206.7           | 21.8                 | 27.9                 | 0.300                | 0.281                |
| 12           | 0.193             | 3746.4           | 19.4                 | 28.0                 | 0.270                | 0.293                |
| 30           | 0.273             | 6788.7           | 19.9                 | 20.4                 | 0.173                | 0.208                |
| 31           | 0.284             | 6980.0           | 20.7                 | 18.9                 | 0.158                | 0.192                |

kann dann ein fiktiver, höhenkonstanter Durchmesser  $d_{Wal}$  dieses Zylinders berechnet werden. Ein Vergleich mit den Brusthöhendurchmessern  $d_{1.3}$  aus Tab. 18 zeigt, daß die tatsächlich gemessenen Durchmesser in 1.3 m Höhe über dem Boden bei jedem Baum ungefähr um 50 % höher sind als die theoretisch aus  $\hat{v}$  bestimmten Werte  $d_{Wal}$ , die in Tab. 20 angegeben sind.

Um die kritische Kraft  $F_{kr}$  abzuschätzen, bei deren Überschreiten ein Baum unter statischer Belastung knickt, wird Gl. (58) von Windirsch (1936) benutzt. Aufgrund der Annahme des kreiszylindrischen Stabes ergibt sich das in dieser Gleichung benötigte Flächenträgheitsmoment  $J$  nach Gl. (101) zu:

$$J = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^4 \quad (101)$$

Damit nimmt Gl. (58) folgende Form an:

$$F_{kr} = \frac{\pi^3}{256} \cdot E \cdot \left(\frac{d^2}{h}\right)^2 \quad (102)$$

Setzt man  $d=d_{Wal}$  und benutzt man für den Elastizitätsmodul  $E$  den Mittelwert parallel zur Faserrichtung aus Tab. 4, so ergeben sich die in Tab. 20 für  $F_{kr}$  zusammengestellten Werte. Sie stellen eine untere Grenze für die bei statischer Belastung zur Knickung eines Baumes notwendigen Kraft dar, da z.B. der Wurzelanlauf hinsichtlich seiner die Standfestigkeit eines Baumes vergrößernden Wirkung nicht berücksichtigt ist.

Um die Größenordnung der berechneten kritischen Kräfte  $F_{kr}$  zu kontrollieren, wurden die horizontalen Windgeschwindigkeiten ermittelt, die auf die vorhandenen Kronenprojektionsflächen  $A$  wirken müssen, um auf den Baum diese kritische Belastung auszuüben. Hierzu wurde einmal Gl. (63) benutzt, wobei  $\bar{F}=F_{kr}$  gesetzt wurde. Mit dem Widerstandsbeiwert  $c_d=0.5$  und der Luftdichte  $\rho_1=1.29 \text{ kg/m}^3$  lieferte diese Gleichung die in Tab. 20 angegebenen Abschätzungen  $u_h^{St}$ . Die horizontalen Windgeschwindigkeiten  $u_h^{Fr}$  wurden aus Gl. (56), die Fraser (1964) aufgrund von Windkanaluntersuchungen aufstellte, mit den jeweiligen

Baummassen  $m$  aus Tab. 19 und  $F=F_{kr}$  bestimmt. Ein Vergleich von  $u_h^{St}$  mit  $u_h^{Fr}$  zeigt, daß die Übereinstimmung der ermittelten horizontalen Windgeschwindigkeiten um so besser ist, je höher die Baummasse  $m$  des jeweiligen Einzelbaumes ist. Dieser Zusammenhang muß jedoch auf den Bereich der Baummassen der Bäume Nr. 1 bis Nr. 30 eingeschränkt werden, da die Übereinstimmung von  $u_h^{St}$  mit  $u_h^{Fr}$  beim schwersten Versuchsbaum Nr. 31 nicht mehr so gut ist, wie bei seinem leichteren Nachbarn Baum Nr. 30.

Die Größenordnungen der horizontalen Windgeschwindigkeiten stimmen gut mit den Werten aus der forstlichen Literatur überein, in der bis jetzt die zum Wurf oder Bruch notwendigen Windgeschwindigkeiten allein aus statischen Überlegungen heraus abgeschätzt wurden. So schrieb z.B. Oehler (1967): "Stürme werfen Bäume von etwa 17 m/s Windgeschwindigkeit an aufwärts". Eine Berücksichtigung des dynamischen Anteils der Windbelastung legt jedoch nahe, daß diese untere Grenze zur Entscheidung, ob bei einem Sturm Schäden auftreten werden oder nicht, modifiziert werden muß.

Wichtige Kenngrößen der dynamischen Baumreaktionen sind die Eigenfrequenzen der Biegeschwingungen der Bäume. Bei Nadelbäumen kommt der 1. Eigenfrequenz  $f_1$ , also der Frequenz der Grundschiwingung die größte Bedeutung zu (Mayhead et al., 1975; Mayer, 1985). Für einen einseitig eingespannten, kreiszylindrischen Stab mit der Länge  $h$  ergibt sich aus Gl. (23) unter Berücksichtigung von Tab. 1 für die Grundschiwingungsfrequenz  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{1.875^2}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho_r \cdot q}} \quad (103)$$

Für einen Kreiszylinder kann man die Querschnittsfläche  $q = \pi \cdot (d/2)^2$  und das Flächenträgheitsmoment  $J$  mit Gl. (101) durch den Zylinderdurchmesser  $d$  ausdrücken, so daß Gl. (103) die folgende Form annimmt:

$$f_1 = \frac{1.875^2 \cdot d}{8 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho_r}} \quad (104)$$

Setzt man in Gl. (104) für den Elastizitätsmodul  $E$  wieder den Mittelwert parallel zur Faserrichtung und für die Rohdichte  $\rho_r$  des Holzes den Wert für den lufttrockenen Zustand aus Tab. 4 ein, so ergeben sich für  $d=d_{\text{Wal}}$  mit der Baumhöhe  $h$  die in Tab. 20 unter  $f_1^{\text{DGL}}$  aufgeführten Werte. Zu Vergleichszwecken wurden die von Mayhead et al. (1975) aus Zugversuchen ermittelten, empirischen Gleichungen zur Berechnung der Grundswingungsdauer in Frequenzen umgerechnet und in Tab. 20 unter  $f_1^{\text{MAY}}$  zusammengestellt. Mayhead et al. (1975) erhielten aus einem Kollektiv von 143 verschiedenen Nadelbäumen für Sitkafichten (*Picea sitchensis*) die in Gl. (105) wiedergegebene Beziehung zur Berechnung der Grundswingungsdauer  $T_1$ , die in dieser Arbeit zur Ermittlung von  $T_1$  bei Fichten (*Picea abies*) verwendet wird:

$$T_1 = 0.432 + 0.169 \cdot \frac{h^2}{d_{1.3}} \quad , \quad r^2 = 0.885, N = 69 \quad (105)$$

Für Kiefern (*Pinus sylvestris*) erhielten Mayhead et al. (1975) die folgende Gleichung:

$$T_1 = 1.497 + 0.136 \cdot \frac{h^2}{d_{1.3}} \quad , \quad r^2 = 0.435, N = 33 \quad (106)$$

Dabei sind in Gl. (105) und Gl. (106) der Brusthöhendurchmesser  $d_{1.3}$  in cm und die Baumhöhe  $h$  in m einzusetzen, um die Grundswingungsdauer  $T_1$  in s zu erhalten. Es zeigt sich erwartungsgemäß sowohl bei  $f_1^{\text{DGL}}$  wie auch bei  $f_1^{\text{MAY}}$  eine Abnahme der Frequenzen mit zunehmender Baumhöhe  $h$ , wobei  $f_1^{\text{DGL}}$  schneller abnimmt als  $f_1^{\text{MAY}}$ . Ferner unterscheiden sich die auf diese beiden Arten berechneten Grundswingungsfrequenzen nicht sehr stark, so z.B. beim höchsten Versuchsbaum Nr. 31 um 0.034 Hz. Im Zeitbereich entspricht dies einem Unterschied der Grundswingungsdauern von 1.1 s.

## 8.2 Häufigkeitsverteilungen und statistische Momente der Baumauslenkungen

Auf die bei Starkwinden und Stürmen auftretenden Windlasten reagieren Bäume im allgemeinen regellos und zufällig. Dies ist auch aus Abb. 43 zu ersehen, in der der zeitliche Verlauf der beiden orthogonalen Komponenten  $y_1$  und  $y_2$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors in 20.0 m Höhe am Beispiel der Fichte (Picea abies) Nr. 1 aus dem Forstenrieder Park dargestellt ist. Es sind 40 Wertepaare in einem äquidistanten zeitlichen Abstand von 0.4 s eingetragen. Da in Abb. 43 nur ein Teil der im Meßlauf M4 vom 30.5.1984 erfaßten Baumauslenkungswerte wiedergegeben ist, stimmen die Mittelwerte, die aus der Abbildung zu entnehmen sind, nicht mit den Werten überein, die aus der

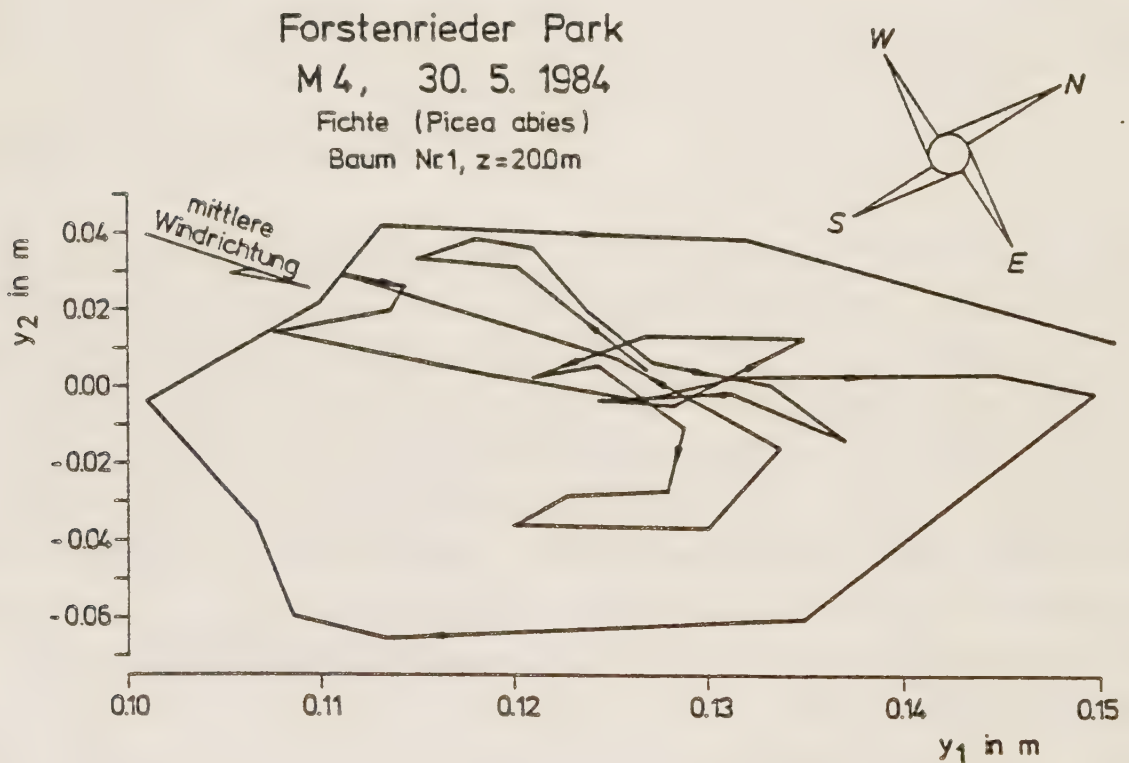


Abb. 43: Zeitverlauf der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen in 20.0 m Höhe über dem Boden beim Baum Nr. 1 im Forstenrieder Park; der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender Wertepaare beträgt 0.4 s

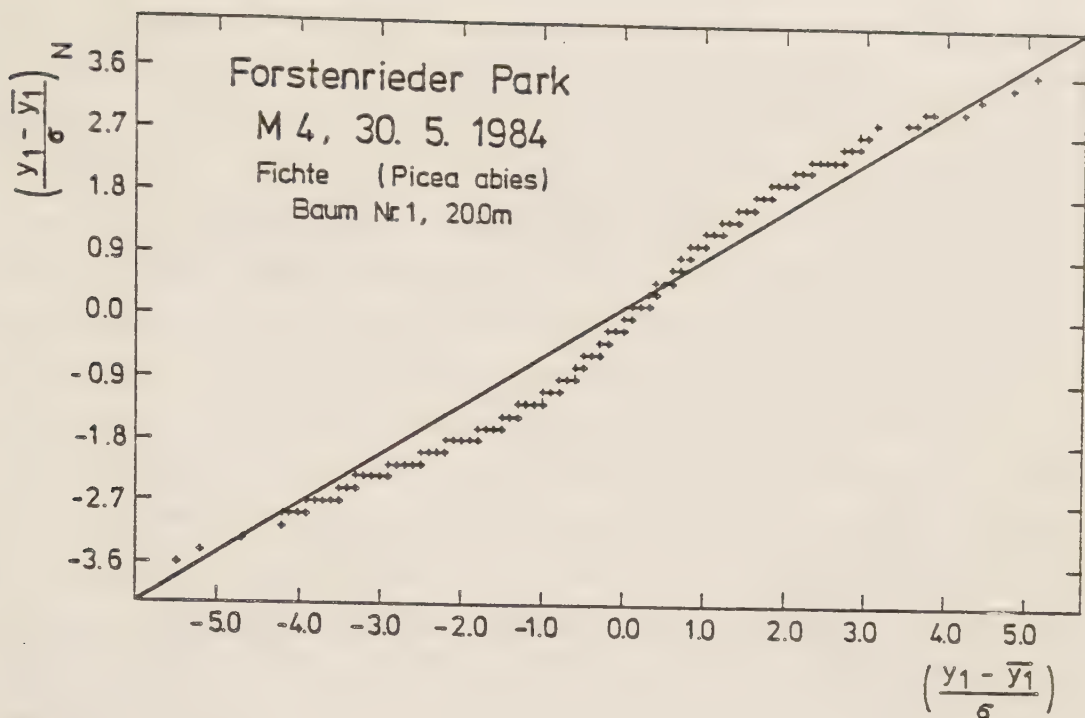


Abb. 44: Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Komponente  $y_1$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park ( $z = 20.0$  m); die durchgezogene Linie entspricht einer Gaußschen Normalverteilung

Mittelung der beiden Komponenten der horizontalen Baumauslenkungen über die gesamte Meßseriendauer erhalten wurden. Dies führt auch dazu, daß der Mittelwert der in Abb. 43 dargestellten  $y_2$ -Werte nicht gleich Null ist, was wegen der durchgeführten Drehung des Koordinatensystems für den über die Meßlaufdauer gemittelten Wert  $\bar{y}_2$  gilt.

Ohne Berücksichtigung von Einschwingvorgängen lassen sich rein phänomenologisch aus Abb. 43 zwei unterschiedliche Wirkungen der Windlasten auf die Baumbewegungen entnehmen. Schwingt der Baum bereits in die Richtung der auf ihn wirkenden dynamischen Windkraft, so wird eine zusätzliche Anregung der Biegeschwingungen erzielt. Dabei können schon durch relativ schwache Windböen die Schwingungsamplituden erheblich vergrößert werden. Schwingt andererseits der Baum gegen die Richtung der auf

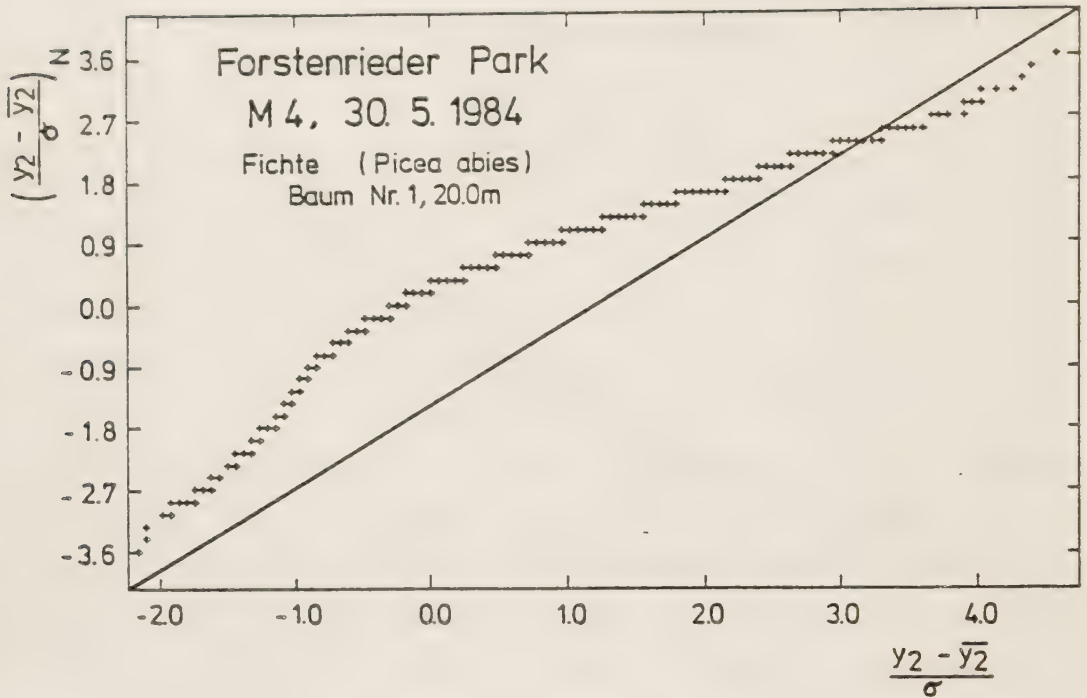


Abb. 45: Häufigkeitsverteilung der lateralen Komponente  $y_2$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park ( $z = 20.0$  m); die durchgezogene Linie entspricht einer Gaußschen Normalverteilung

ihn wirkenden dynamischen Windkraft, so wird dadurch eine zusätzliche Dämpfung der Schwingung hervorgerufen, die im Abschnitt 5.3 als aerodynamische Dämpfung bezeichnet wurde. Insbesondere bei länger andauernden Böen kann die Bewegung des Baumes in der ursprünglichen Richtung vollständig zum Erliegen kommen, um sich dann in Richtung der wirkenden Windbelastung fortzusetzen. Diese Vorgänge während der Schwingungen sind, wie der Einschwingvorgang, bei bekanntem Strömungsfeld nur noch von baumspezifischen Parametern abhängig. In diesem Zusammenhang sind die Art der Verankerung, die Elastizität der Wurzeln und des Stammes, die Höhe, Dicke und Form des Stammes, Form und Größe der Krone, sowie die mechanische Stützwirkung der Nachbarbäume bei Bäumen im Bestand von Bedeutung (Nielsen, 1985).

In Abb. 44 und Abb. 45 sind, wieder am Beispiel des Meßlaufes M4 vom 30.5.1984, die Häufigkeitsverteilungen der orthogonalen Komponenten  $y_1$  und  $y_2$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors in 20.0 m Höhe über dem Boden enthalten. Die Art der Darstellung entspricht derjenigen in Abb. 34 bis Abb. 36, wobei hier nicht die aus den Messungen ermittelten Komponenten des horizontalen Baumauslenkungsvektors an der Abszisse aufgetragen wurden, sondern ihre mit der Standardabweichung  $\sigma$  normierten Fluktuationen  $y'_i$ ,  $i=1,2$ . Die absoluten Werte von  $y_1$  und  $y_2$  besitzen nämlich nur eine eingeschränkte Aussagekraft, da insbesondere bei stark böigen Meßserien eine exakte Nachjustierung der Nullstellung der Meßverstärker wegen der fortwährend wirkenden dynamischen Windlasten unmöglich war. Als Folge davon geben die in Tab. 21 bis Tab. 26 enthaltenen Mittelwerte der  $y_1$ -Komponente auch keine Auskunft über die tatsächlich aufgetretenen stationären Windlasten.

Die Ergebnisse für den Meßlauf M4 vom 30.5.1984 zeigen exemplarisch für den Baum Nr. 1 (Abb. 44, Abb. 45), daß insbesondere die laterale Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors nicht normalverteilt ist, während die Verteilung der longitudinalen Komponente nahezu einer Gaußschen Normalverteilung entspricht. Die in Tab. 21 enthaltenen Zentralmomente 3. und 4. Ordnung der Verteilungen von  $y_1$  und  $y_2$  für diesen Meßlauf bestätigen, im Vergleich zu  $y_1$ -Komponente, die größeren Abweichungen der  $y_2$ -Komponente von einer Gaußverteilung. Analysiert man jedoch alle in dieser Tabelle enthaltenen Meßserien für den Baum Nr. 1, so zeigt sich, daß bei beiden Komponenten des horizontalen Baumauslenkungsvektors die Schiefe  $S$  und die Kurtosis  $K$  doch erheblich von den für eine Gaußverteilung geforderten Werten  $S=0.0$  und  $K=3.0$  abweichen können. Gleiches gilt auch für alle anderen untersuchten Bäume, was die in Tab. 22 bis Tab. 26 zusammengestellten Werte belegen. Ein Vergleich der entsprechenden Meßserien vom 30.5.1984 zeigt dann (Tab. 21, Tab. 22), daß die Varianzen der  $y_1$ -Komponente in 20.0 m Höhe über dem Boden beim Baum Nr. 7 immer größer sind als in der gleichen Höhe beim Baum Nr. 1. Dies ist u.a.

Tab. 21: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 1 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Forstenrieder Park

| Meßserie     | Höhe<br>m | $y_1$ -Komponente |                          |      |      | $y_2$ -Komponente |                          |      |      |
|--------------|-----------|-------------------|--------------------------|------|------|-------------------|--------------------------|------|------|
|              |           | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    |
|              |           | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      |
| M2,31.1.1983 | 6.0       | 14.0              | 50.4                     | -1.2 | 6.3  | 0.0               | 41.8                     | -1.3 | 8.1  |
|              | 12.0      | 40.9              | 254.4                    | -1.0 | 6.1  | 0.0               | 219.2                    | -1.1 | 7.8  |
|              | 20.0      | 110.0             | 1279.7                   | -0.6 | 6.3  | 0.0               | 1096.7                   | -1.3 | 6.9  |
| M3,31.1.1983 | 6.0       | 12.8              | 69.2                     | -1.0 | 4.9  | 0.0               | 52.1                     | -0.8 | 7.2  |
|              | 12.0      | 37.1              | 388.8                    | -0.8 | 5.1  | 0.0               | 280.3                    | -0.8 | 6.6  |
|              | 20.0      | 107.9             | 1635.0                   | -0.5 | 5.0  | 0.0               | 1406.9                   | -0.9 | 5.7  |
| M7,31.1.1983 | 6.0       | 39.8              | 15.9                     | -0.5 | 7.0  | 0.0               | 9.9                      | -1.6 | 6.2  |
|              | 12.0      | 61.8              | 60.3                     | -1.5 | 8.5  | 0.0               | 74.3                     | -1.0 | 6.0  |
|              | 20.0      | 154.9             | 351.3                    | -1.1 | 7.5  | 0.0               | 332.7                    | -1.5 | 6.2  |
| M2,30.5.1984 | 6.0       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|              | 12.0      | 48.5              | 48.7                     | 0.0  | 3.5  | 0.0               | 15.0                     | 1.8  | 8.9  |
|              | 20.0      | 20.4              | 22.9                     | -0.8 | 5.8  | 0.0               | 34.3                     | 1.6  | 6.1  |
| M4,30.1.1984 | 6.0       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|              | 12.0      | 101.5             | 22.5                     | 0.0  | 3.2  | 0.0               | 9.9                      | 1.2  | 4.6  |
|              | 20.0      | 34.6              | 15.7                     | 0.4  | 5.3  | 0.0               | 25.8                     | 1.2  | 4.3  |
| M7,30.1.1984 | 6.0       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|              | 12.0      | 71.4              | 24.6                     | 0.4  | 4.4  | 0.0               | 14.7                     | 1.1  | 4.8  |
|              | 20.0      | 16.1              | 25.0                     | 0.5  | 6.3  | 0.0               | 44.2                     | 1.1  | 6.5  |

durch den im Verlauf vorausgegangener Stürme stark gelockerten Wurzelteller des Baumes Nr. 7 zu erklären.

Da durch die Varianz die mittlere Abweichung der Meßwerte von ihrem Mittelwert charakterisiert wird, zeigen größere Varian-

Tab. 22: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 20.0 m Höhe beim Baum Nr. 7 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Forstenrieder Park

| Meßserie     | Höhe<br>m | $y_1$ -Komponente |                          |      |     | $y_2$ -Komponente |                          |     |     |
|--------------|-----------|-------------------|--------------------------|------|-----|-------------------|--------------------------|-----|-----|
|              |           | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K   | Mit               | $\sigma^2$               | S   | K   |
|              |           | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |     | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |     |     |
| M2,30.5.1984 | 20.0      | 32.1              | 81.6                     | 1.4  | 7.7 | 0.0               | 126.9                    | 1.5 | 6.9 |
| M4,30.5.1984 | 20.0      | 62.4              | 61.7                     | 0.7  | 5.1 | 0.0               | 67.8                     | 1.1 | 5.3 |
| M7,30.5.1984 | 20.0      | 22.1              | 105.7                    | -0.2 | 5.8 | 0.0               | 101.0                    | 1.2 | 5.1 |

zen der Baumauslenkungen auch größere Schwingungsamplituden des Baumes in der jeweiligen Meßhöhe an. Größere Schwingungsamplituden erhöhen aber nach Hütte (1983) die Windwurfanfälligkeit bei der Fichte (*Picea abies*), da jede Baumschwingung dazu führt, daß das Oberflächenwasser durch den Wurzelteller der Fichte in den Boden 'eingeknetet' wird, wodurch besonders auf der Leeseite des Baumes die Tragfähigkeit des Bodens nachläßt, bis der Baum schließlich kippt.

Die auffallend hohen Varianzen der  $y_1$ -Komponente in 12.0 m Höhe über dem Boden beim Baum Nr. 1 während der Meßserien vom 30.5.1984 dürften größtenteils auf die bereits erwähnte fehlerhafte Justierung des Trägerfrequenz-Meßverstärkers zurückzuführen sein, die gleichzeitig auch die hohen Mittelwerte der  $y_1$ -Komponente bewirkt. Wegen der durchgeführten Drehung des Koordinatensystems sind die Mittelwerte der  $y_2$ -Komponente gleich Null, so daß bei dieser Komponente der Einfluß der fehlerhaften Justierung nicht mehr auftritt. Wie aus den Meßläufen am 31.1.1983 zu ersehen ist (Tab. 21), sind beim Baum Nr. 1 im allgemeinen hohe mittlere Baumauslenkungen mit großen

Tab. 23: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 11 (Kiefer) während ausgewählter Meßserien im Hofoldingener Forst

| Meßserie      | Höhe<br>m | $y_1$ -Komponente |                          |      |      | $y_2$ -Komponente |                          |      |      |
|---------------|-----------|-------------------|--------------------------|------|------|-------------------|--------------------------|------|------|
|               |           | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    |
|               |           | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      |
| M6, 7.2.1984  | 4.5       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|               | 9.0       | 22.9              | 27.9                     | -3.0 | 24.2 | 0.0               | 31.2                     | 0.9  | 12.2 |
|               | 15.0      | 182.2             | 154.7                    | 1.9  | 14.6 | 0.0               | 155.8                    | 0.2  | 14.5 |
| M9, 7.2.1984  | 4.5       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|               | 9.0       | 49.1              | 4.5                      | -3.4 | 29.1 | 0.0               | 4.6                      | 0.6  | 14.6 |
|               | 15.0      | 126.4             | 26.8                     | 2.5  | 22.1 | 0.0               | 20.9                     | 1.6  | 18.8 |
| M10, 7.2.1984 | 4.5       | -. -              | -. -                     | -. - | -. - | -. -              | -. -                     | -. - | -. - |
|               | 9.0       | 50.7              | 1.8                      | -2.6 | 18.4 | 0.0               | 2.4                      | -2.3 | 30.0 |
|               | 15.0      | 124.1             | 9.9                      | 2.3  | 28.2 | 0.0               | 155.8                    | 0.2  | 14.5 |
| M2, 8.2.1984  | 4.5       | 1.7               | 0.3                      | 1.2  | 6.2  | 0.0               | 0.1                      | -0.1 | 10.2 |
|               | 9.0       | 1.0               | 2.0                      | -2.4 | 18.0 | 0.0               | 6.2                      | 2.3  | 12.4 |
|               | 15.0      | 6.1               | 25.4                     | 2.4  | 13.1 | 0.0               | 9.7                      | 2.4  | 21.9 |
| M4, 8.2.1984  | 4.5       | 3.2               | 0.3                      | 2.5  | 16.8 | 0.0               | 0.1                      | 0.8  | 15.1 |
|               | 9.0       | 1.7               | 5.4                      | -0.3 | 14.7 | 0.0               | 7.7                      | 2.9  | 23.1 |
|               | 15.0      | 7.2               | 37.8                     | 2.5  | 18.4 | 0.0               | 29.3                     | 1.7  | 20.4 |

Varianzen verknüpft, die ihrerseits mit zunehmender Meßhöhe ansteigen. Unterstellt man diese Abhängigkeit auch für die Meßserien vom 30.5.1984, so kann man hierdurch die mit ansteigender Baumhöhe zunehmenden Varianzen der lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors erklären.

Dieses Verhalten, das am Beispiel des Baumes Nr. 1 etwas ausführlicher dargestellt wurde, gilt prinzipiell auch für alle

Tab. 24: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 15.0 m Höhe beim Baum Nr. 12 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Hofoldinginger Forst

| Meßserie      | Höhe<br>m | $y_1$ -Komponente |                          |      |      | $y_2$ -Komponente |                          |      |      |
|---------------|-----------|-------------------|--------------------------|------|------|-------------------|--------------------------|------|------|
|               |           | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    |
|               |           | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      |
| M6, 7.2.1984  | 15.0      | 40.9              | 44.9                     | -0.9 | 9.7  | 0.0               | 56.1                     | -1.1 | 13.9 |
| M9, 7.2.1984  | 15.0      | 45.7              | 6.2                      | -0.2 | 12.4 | 0.0               | 6.5                      | -3.1 | 22.2 |
| M10, 7.2.1984 | 15.0      | 46.0              | 3.9                      | 0.4  | 8.1  | 0.0               | 2.8                      | -1.6 | 7.6  |

Tab. 25: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 30 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Ebersberger Forst

| Meßserie     | Höhe<br>m | $y_1$ -Komponente |                          |      |      | $y_2$ -Komponente |                          |      |      |
|--------------|-----------|-------------------|--------------------------|------|------|-------------------|--------------------------|------|------|
|              |           | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    | Mit               | $\sigma^2$               | S    | K    |
|              |           | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      | $10^{-2}$ m       | $10^{-4}$ m <sup>2</sup> |      |      |
| M1, 4.1.1984 | 14.5      | 3.2               | 88.1                     | -0.8 | 7.5  | 0.0               | 83.1                     | 1.4  | 8.7  |
|              | 24.5      | 12.4              | 429.3                    | 0.3  | 6.7  | 0.0               | 462.0                    | -1.5 | 9.7  |
| M3, 4.1.1984 | 14.5      | 7.5               | 134.8                    | -1.1 | 9.2  | 0.0               | 168.5                    | -1.2 | 7.3  |
|              | 24.5      | 23.5              | 589.1                    | 0.2  | 7.1  | 0.0               | 1011.4                   | -1.4 | 7.3  |
| M4, 4.1.1984 | 14.5      | 10.5              | 143.0                    | -1.5 | 11.4 | 0.0               | 179.0                    | -1.2 | 10.9 |
|              | 24.5      | 26.8              | 626.3                    | -0.1 | 8.7  | 0.0               | 1098.7                   | -1.6 | 10.7 |
| M5, 4.1.1984 | 14.5      | 22.7              | 104.8                    | -1.5 | 10.0 | 0.0               | 138.1                    | -1.3 | 10.0 |
|              | 24.5      | 10.4              | 862.7                    | 1.5  | 8.8  | 0.0               | 412.0                    | -0.7 | 8.2  |
| M8, 4.1.1984 | 14.5      | 41.7              | 47.6                     | -1.4 | 10.8 | 0.0               | 57.6                     | -1.9 | 14.0 |
|              | 24.5      | 16.2              | 157.3                    | -0.1 | 7.4  | 0.0               | 379.1                    | -2.2 | 15.0 |

Tab. 26: Mittelwert Mit (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 25.0 m Höhe beim Baum Nr. 31 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Ebersberger Forst

| Meßserie     | Höhe | $y_1$ -Komponente  |                                 |     |      | $y_2$ -Komponente  |                                 |      |      |
|--------------|------|--------------------|---------------------------------|-----|------|--------------------|---------------------------------|------|------|
|              |      | Mit                | $\sigma^2$                      | S   | K    | Mit                | $\sigma^2$                      | S    | K    |
|              |      | 10 <sup>-2</sup> m | 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> |     |      | 10 <sup>-2</sup> m | 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> |      |      |
| M1, 4.1.1984 | 25.0 | 9.5                | 284.9                           | 1.2 | 6.4  | 0.0                | 165.1                           | -0.4 | 5.1  |
| M3, 4.1.1984 | 25.0 | 18.2               | 447.6                           | 0.9 | 7.1  | 0.0                | 205.1                           | -1.2 | 6.9  |
| M4, 4.1.1984 | 25.0 | 18.3               | 496.6                           | 1.3 | 10.8 | 0.0                | 233.0                           | -1.7 | 9.7  |
| M5, 4.1.1984 | 25.0 | 18.3               | 388.7                           | 0.5 | 7.1  | 0.0                | 192.5                           | -1.6 | 7.3  |
| M8, 4.1.1984 | 25.0 | 26.9               | 125.7                           | 0.5 | 5.9  | 0.0                | 122.6                           | -2.0 | 10.7 |

anderen untersuchten Bäume. Analysiert man die aus den Meßwerten ermittelten Varianzen von  $y_1$  und  $y_2$  als Maß für die Größe der Amplituden der Stammbewegungen in den entsprechenden Höhen, so zeigt sich hier wieder die große Bedeutung der Grundschwingung für die Baumbewegungen unter Windeinwirkung. Die Meßhöhen an den einzelnen Versuchsbäumen waren nämlich in Abhängigkeit von ihrer Höhe so festgelegt worden, daß die unterste und die oberste Meßhöhe näherungsweise mit den Höhen der Schwingungsbäuche der 2. Oberschwingung und die mittlere Meßhöhe mit der Höhe des Schwingungsbauches der 1. Oberschwingung übereinstimmten. Dabei war für den Baum ein Schwingungsverhalten analog zum einseitig eingespannten Stab vorausgesetzt worden. Würde nun die 1. oder 2. Oberschwingung für Baumschwingungsvorgänge eine größere Bedeutung besitzen als die Grundschwingung, so müßten entweder in der mittleren oder in der oberen bzw. unteren Meßhöhe jeweils maximale Varianzbeiträge von  $y_1$  und  $y_2$  auftreten. Da dies nicht der Fall ist, sondern vielmehr die Varianzen von  $y_1$  und  $y_2$  im Mittel eine

eindeutige Zunahme mit ansteigender Höhe über dem Boden zeigen, wird dadurch die starke Abhängigkeit des Schwingungsverhaltens von Nadelbäumen von der Grundswingungsfrequenz unterstrichen. Bei dieser Folgerung wurde die Bedeutung der 3. und höherer Oberschwingungen in bezug auf das Schwingungsverhalten eines Nadelbaumes vernachlässigt, da z.B. schon Frequenzen der 3. Oberschwingung bei allen untersuchten Bäumen größer als 5 Hz waren, d.h. in einem Frequenzbereich lagen, in dem die im Windfeld enthaltene turbulente Energie zur Schwingungsanregung von Bäumen nicht mehr ausreicht.

### 8.3 Spektren der Fluktuationen der Baumauslenkungen

Aus den Häufigkeitsverteilungen bzw. den Momenten der Verteilungen der beiden Komponenten  $y_1$  und  $y_2$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors kann das Frequenzverhalten der schwingenden Versuchsbäume nur qualitativ abgeleitet werden. Zur Quantifizierung der Baumschwingungen eignen sich z.B. die Spektren der Fluktuationen von  $y_1$  und  $y_2$  wesentlich besser. Deshalb wurden solche Spektren berechnet, wobei wie bei der Berechnung der Windspektren die Methode von Blackman und Tukey (1958) verwendet wurde.

Im folgenden sind in Abb. 46 bis Abb. 51 für jeden Versuchsb Baum die Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors  $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$  dargestellt. Da das Schwingungsverhalten am deutlichsten aus den Ergebnissen für die obersten Meßhöhen jedes Baumes zu entnehmen ist, wurden die Spektren aus den anderen Meßhöhen nicht in die vorliegende Arbeit mit aufgenommen.

Alle abgebildeten Spektren weisen im Gegensatz zu den Schubspannungsspektren ein ausgeprägtes Maximum auf und fallen zu höheren Frequenzen hin rasch ab. Dieser Verlauf tritt bei longitudinalen und lateralen Spektren der Baumauslenkungen in gleicher Weise auf. Unter Berücksichtigung der Ordinateneinteilungen sind bei den untersuchten Fichten (*Picea abies*) die

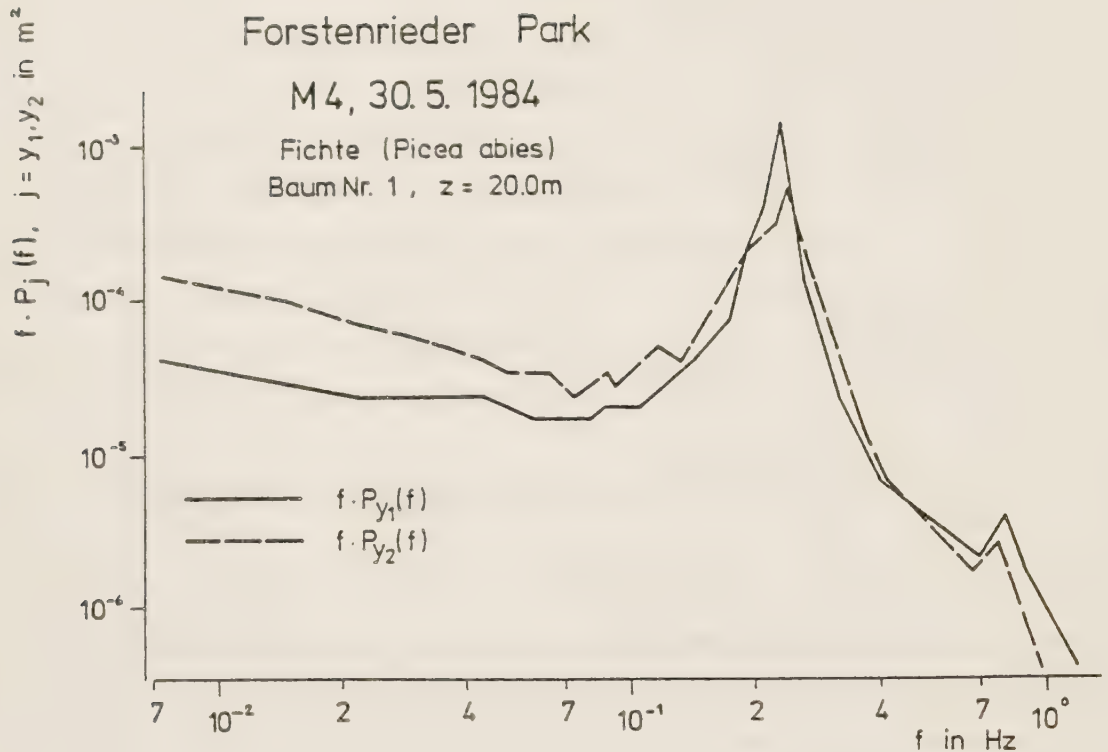


Abb. 46: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park; Meßhöhe:  $z = 20.0$  m

Maxima von  $f \cdot P_{y_2}(f)$  im allgemeinen kleiner als die Maxima von  $f \cdot P_{y_1}(f)$ . Bei den Spektren der Kiefer (*Pinus sylvestris*) in Abb. 48 ist jedoch im Unterschied zu den untersuchten Fichten das Maximum des lateralen Baumauslenkungsspektrum größer als das des longitudinalen.

Die Meßläufe aus dem Hofoldingener und Ebersberger Forst (Abb. 48 bis Abb. 51) weisen bei den Spektren beider Komponenten des horizontalen Baumauslenkungsvektors ein langsames Ansteigen vom niederfrequenten Ende des Spektrums bis hin zum Hauptmaximum auf. Danach fallen sie relativ rasch zum hochfrequenten Ende des Spektrums hin ab.

Nur bei den Bäumen Nr. 1 und Nr. 7 (Abb. 46, Abb. 47) im For-

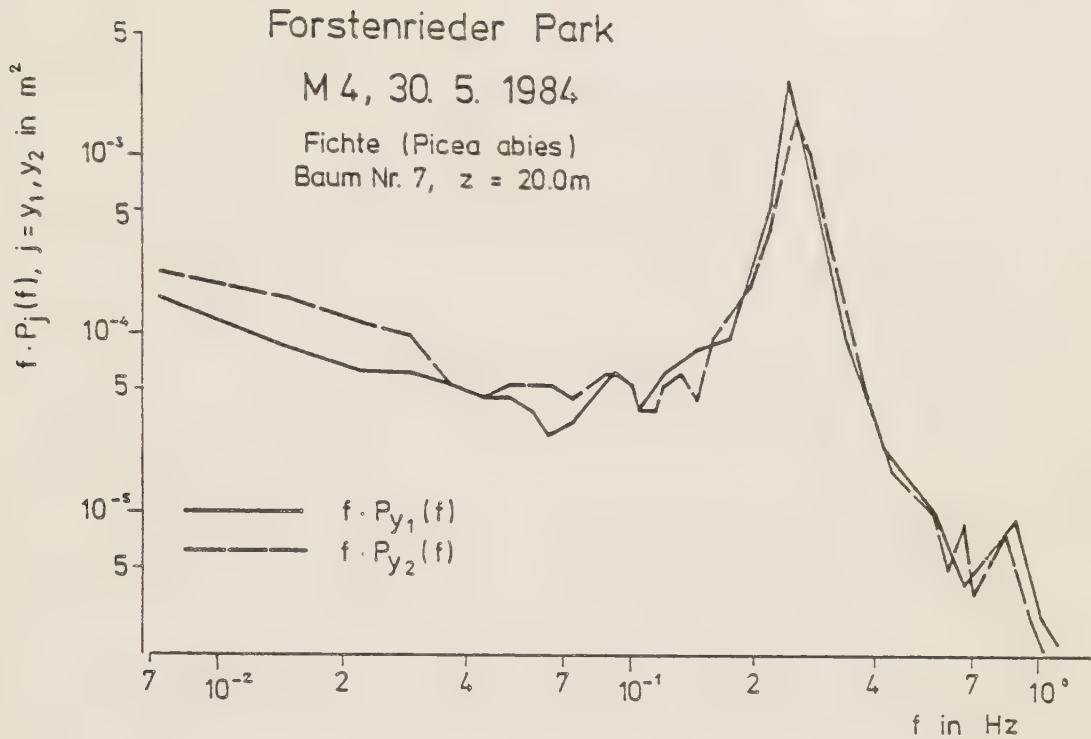


Abb. 47: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 7 im Forstenrieder Park; Meßhöhe:  $z = 20.0\text{ m}$

Forstenrieder Park fallen die Spektren vom niederfrequenten Ende zuerst bis zu Frequenzen  $f$  zwischen  $0.05\text{ Hz} \leq f \leq 0.07\text{ Hz}$  ab, um dann zum primären Maximum des Spektrums anzusteigen. Dieser Spektrenverlauf läßt sich damit deuten, daß im Gegensatz zu den anderen untersuchten Nadelbäumen, diese zwei Fichten einen Bereich mit einer zusätzlichen frequenzabhängigen Dämpfung besitzen, die die Schwingungsanfälligkeit bei Schwingungsdauern zwischen  $14\text{ s}$  und  $20\text{ s}$  herabsetzt. Für den Baum Nr. 7 könnte man diesen Verlauf der Spektren mit dem gelockerten Wurzelteller, was in physikalischer Hinsicht einer Verminderung der starren Einspannung des Baumes im Boden entspricht, in Verbindung bringen. Aufgrund des ähnlichen Verlaufes der Baumauslenkungsspektren beim Baum Nr. 1 muß man auch hier annehmen, daß seine Wurzeln nicht mehr fest im Boden verankert waren. Eine

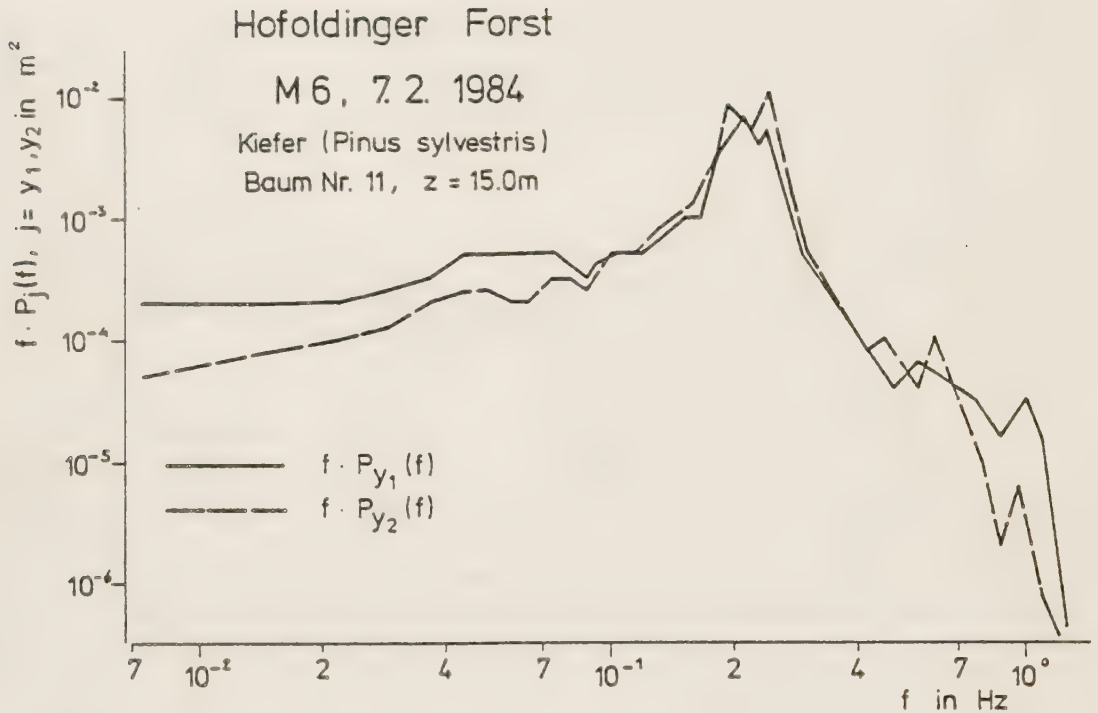


Abb. 48: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 11 im Hofoldinger Forst; Meßhöhe:  $z = 15.0 \text{ m}$

physikalische Erklärung der Auswirkungen der Wurzellockerungsprozesse auf das dynamische Verhalten einer Fichte kann hier aber wegen der fehlenden Wurzel- und Verankerungsuntersuchungen an den Versuchsbäumen nicht gegeben werden. Solche Untersuchungen wurden u.a. von Nielsen (1985) durchgeführt, auf die an dieser Stelle verwiesen wird. Der Bereich des spektralen 'gap' in den Baumauslenkungsspektren in Abb. 46 und Abb. 47 legt es nahe, daß hier die dynamischen Windlasten im Vergleich zu den statischen zurücktreten. Diese Frage kann jedoch nur auf der Basis weiterer Untersuchungen, in denen insbesondere die Wurzelung der Versuchsbäume berücksichtigt werden muß, befriedigend beantwortet werden.

Ein Amplitudenvergleich der spektralen Varianzanteile der

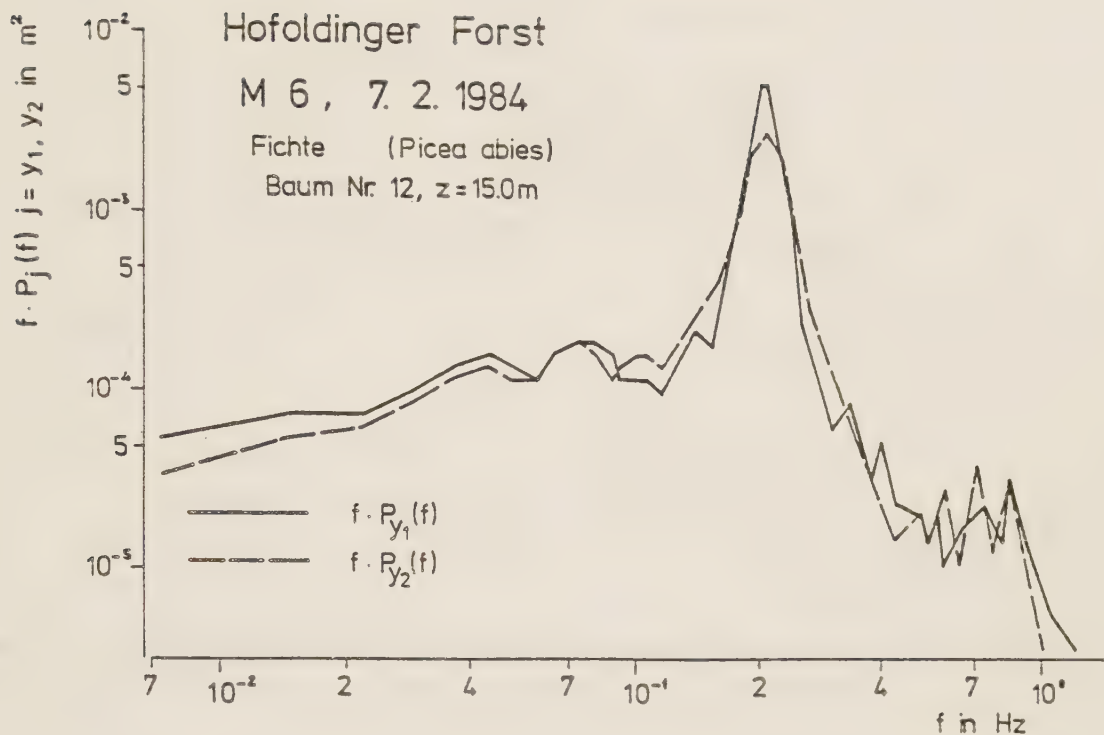


Abb. 49: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 12 im Hofoldinginger Forst; Meßhöhe:  $z = 15.0$  m

Baumauslenkungsspektren zeigt den Einfluß der Baumhöhe auf die Ordinatenwerte der Spektren. Je höher eine Fichte (*Picea abies*) ist, umso größer sind auch die spektralen Varianzanteile. Bemerkenswert ist hier das Verhalten der Kiefer (*Pinus sylvestris*), die als kleinster Versuchsbaum fast so hohe Spektralwerte aufweist wie die um mehr als 12 m höheren Fichten im Ebersberger Forst.

Eine bessere Klassifizierung der Amplituden der Baumauslenkungsspektren gestattet der in der forstlichen Praxis häufig verwendete  $h/d$ -Wert. Dieser Wert ist der Quotient der Baumhöhe  $h$  und des Brusthöhendurchmessers  $d_{1.3}$ , wobei hier die Schreibweise der forstlichen Literatur verwendet wird und der Index bei der Bezeichnung des Brusthöhendurchmessers weggelassen

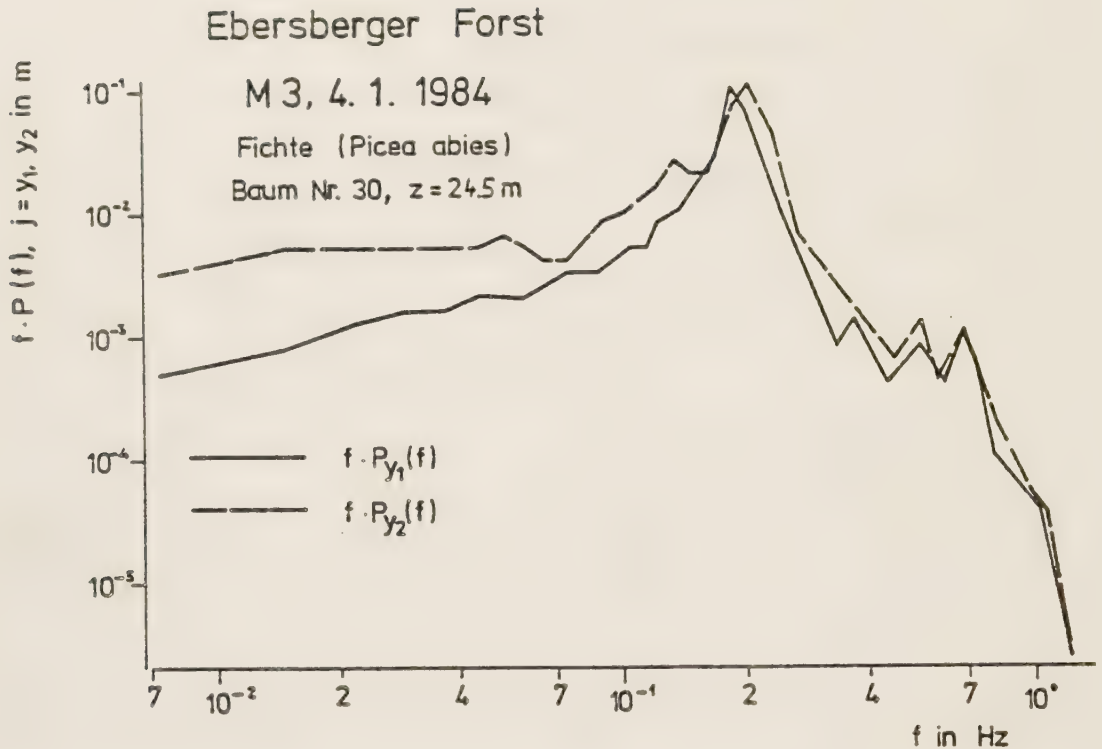


Abb. 50: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j = y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 30 im Ebersberger Forst; Meßhöhe:  $z = 24.5$  m

wird. Der  $h/d$ -Wert dient zur Kennzeichnung der Wuchskonstellation und der Umweltbezogenheit eines Baumes insbesondere im Hinblick auf seine mechanische Widerstandsfähigkeit gegenüber Sturm- und Schneeschäden (Abetz, 1976). Im allgemeinen sind Nadelbäume mit einem niederen  $h/d$ -Wert stabiler als solche mit einem hohen. Es zeigt sich, daß der Baum Nr. 1 mit einem  $h/d$ -Wert von 67, dem niedrigsten aller untersuchten Bäume, auch die geringsten spektralen Varianzbeiträge besitzt. Im Gegensatz dazu hat der Baum Nr. 31 mit dem größten  $h/d$ -Wert ( $h/d = 81$ ) aller Versuchsbäume auch die größten Varianzbeiträge. Allerdings sind die Unterschiede zum Baum Nr. 30 mit einem  $h/d$ -Wert von 79 nicht sehr groß, was durch einen Vergleich von Abb. 50 mit Abb. 51 bestätigt wird.

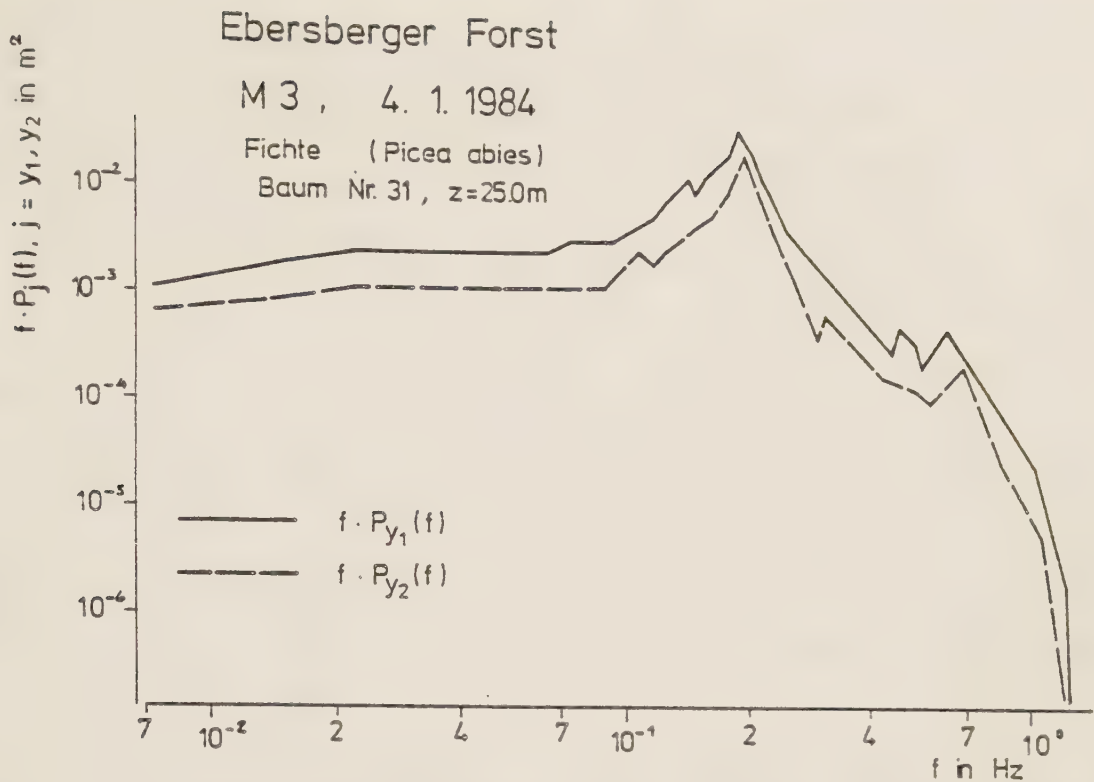


Abb. 51: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 31 im Ebersberger Forst; Meßhöhe:  $z = 25.0$  m

Zusammenfassend ergibt sich mit dem  $h/d$ -Wert folgende Interpretationsmöglichkeit der Baumauslenkungsspektren von Fichten: Je höher der  $h/d$ -Wert einer Fichte ist, desto größer sind die Varianzanteile in den Baumauslenkungsspektren und um so geringer ist auch die Widerstandsfähigkeit des Baumes in bezug auf Windbelastungen.

Leider kann der für die Baumart Fichte (*Picea abies*) gefundene Zusammenhang nicht auf die Baumart Kiefer (*Pinus sylvestris*) erweitert werden. Wie aus Abb. 48 zu entnehmen ist, weist die Kiefer Nr. 11, die mit einem  $h/d$ -Wert von 76 nahezu den selben Wert wie die Fichte Nr. 7 besitzt, durchschnittlich um den Faktor 5 höhere Spektralwerte als der Baum Nr. 7 auf. Berücksichtigt man die in der forstlichen Praxis weit verbreitete

Tab. 27: Aus den Auslenkungsspektren entnommene und berechnete Eigenfrequenzen der 1. Oberschwingung;  $f_2(y_1)$ : Frequenz des sekundären Maximums des longitudinalen Auslenkungsspektrums,  $f_2(y_2)$ : analog  $f_2(y_1)$ ,  $f_2(\text{be})$ : berechnete Frequenz der 1. Oberschwingung, alle Einheiten in Hz

|                  | Baum<br>Nr. 1 | Baum<br>Nr. 7 | Baum<br>Nr. 11 | Baum<br>Nr. 12 | Baum<br>Nr. 30 | Baum<br>Nr. 31 |
|------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $f_2(y_1)$       | 0.46          | 0.44          | 0.65           | 0.87           | 0.70           | 0.67           |
| $f_2(y_2)$       | 0.58          | 0.68          | 0.60           | 0.73           | 0.70           | 0.67           |
| $f_2(\text{be})$ | 1.60          | 1.39          | 1.88           | 1.69           | 1.08           | 0.99           |

Meinung, daß die Kiefer eine sturmsichere Baumart sei (Koestler et al., 1968), so widersprechen die vorliegenden Ergebnisse für die Kiefer der forstlichen Erfahrung. Da jedoch nur eine einzige Kiefer in dieser Arbeit untersucht wurde, kann der angegebene Widerspruch lediglich als Anhaltspunkt genommen werden, um weitere Untersuchungen an einer ausreichend großen Zahl von Kiefern durchzuführen. Nur dann wird es möglich sein, begründete Aussagen zur Sturmsicherheit der Kiefer im Vergleich zur Fichte zu machen.

Assoziiert man die Maxima in den Baumauslenkungsspektren mit den Eigenfrequenzen der Versuchsbäume, so wird durch die in Abb. 46 bis Abb. 51 wiedergegebenen Spektren die dominierende Bedeutung der 1. Eigenfrequenz bestätigt. Im Vergleich hierzu weisen die sekundären Maxima, die in allen Baumauslenkungsspektren auftreten, sehr viel geringere Beträge auf. Die Frequenzen dieser sekundären Maxima sollten dann den Frequenzen der 1. Oberschwingung entsprechen, die man über Gl. (23) unter Verwendung von Tab. 1 für die Versuchsbäume theoretisch errechnen kann. In Tab. 27 sind die aus den longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren entnommenen Eigenfrequenzen  $f_2$  der 1. Oberschwingung den so berechneten Eigenfrequenzen gegen-

übergestellt. Aus dieser Tabelle erkennt man nahezu keine Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Frequenzen der 1. Oberschwingung. Die berechneten Eigenfrequenzen liegen alle, mit Ausnahme der Eigenfrequenzen für die Bäume Nr. 30 und Nr. 31, bei Frequenzen  $f > 1.25$  Hz, also oberhalb der für diese Spektren ermittelten Nyquist-Frequenz. Da jedoch, wie später noch gezeigt wird, für die Grundswingungsfrequenzen die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Frequenzen sehr gut ist, soll die Hypothese, daß sich das Schwingungsverhalten eines Baumes durch das eines einseitig eingespannten Stabes beschreiben läßt, auch für die 2. Eigenfrequenzen weiter beibehalten werden. Allerdings zeigen die Werte aus Tab. 27, daß diese einfache Annahme zur Berechnung der Frequenzen der Oberschwingungen ungeeignet ist und zu falschen Ergebnissen führt. Genauere Resultate sind jedoch dann zu erwarten, wenn es gelingt, den Einfluß der ober- und unterirdischen Baumorgane auf das Schwingungsverhalten des Baumstammes durch geeignete Messungen exakter zu erfassen, so daß das Verhalten eines Nadelbaumes im Bereich der Oberschwingungen besser parametrisiert werden kann.

Das Schwingungsverhalten eines Körpers wird, wie bereits im Abschnitt 2.2 erläutert, weitgehend durch seine Eigenfrequenzen und durch sein Dämpfungsverhalten bestimmt. Aufgrund der zuvor genannten Schwierigkeiten konnten für die untersuchten Bäume aus den Spektren der horizontalen Baumauslenkungen nur die Grundswingungsfrequenz und das logarithmische Dekrement  $\delta T$  ermittelt werden. Die Berechnung von  $\delta T$  erfolgte dabei nach Gl. (34). In Tab. 28 bis Tab. 33 sind für jeden Versuchsbaum, komponentenweise aufgegliedert, die Frequenzen des primären Maximums  $f_{\max}$  der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  zusammengestellt.

Der Vergleich der aus den Messungen bestimmten Frequenzen  $f_{\max}$  mit den berechneten Frequenzen  $f_1^{\text{DGL}}$  und  $f_1^{\text{MAY}}$  aus Tab. 20 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen diesen Werten. Während durch die  $f_1^{\text{MAY}}$  für jeden Versuchsbaum die Grundswingungsfre-

Tab. 28: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 1 im Forstenrieder Park

|               | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|---------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               |              | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ |
| M2, 31.1.1983 | 6.0          | 0.24                       | 0.27       | 0.24                       | 0.32       |
|               | 12.0         | 0.24                       | 0.27       | 0.24                       | 0.33       |
|               | 20.0         | 0.24                       | 0.28       | 0.24                       | 0.45       |
| M3, 31.1.1983 | 6.0          | 0.22                       | 0.57       | 0.24                       | 0.31       |
|               | 12.0         | 0.22                       | 0.39       | 0.24                       | 0.30       |
|               | 20.0         | 0.24                       | 0.37       | 0.24                       | 0.30       |
| M7, 31.1.1983 | 6.0          | 0.23                       | 0.32       | 0.26                       | 0.58       |
|               | 12.0         | 0.23                       | 0.35       | 0.23                       | 0.35       |
|               | 20.0         | 0.23                       | 0.36       | 0.23                       | 0.60       |
| M2, 30.5.1984 | 6.0          | -. -                       | -. -       | -. -                       | -. -       |
|               | 12.0         | 0.24                       | 0.19       | 0.26                       | 0.54       |
|               | 20.0         | 0.23                       | 0.28       | 0.22                       | 0.40       |
| M4, 30.5.1984 | 6.0          | -. -                       | -. -       | -. -                       | -. -       |
|               | 12.0         | 0.24                       | 0.25       | 0.26                       | 0.42       |
|               | 20.0         | 0.23                       | 0.19       | 0.23                       | 0.36       |
| M7, 30.5.1984 | 6.0          | -. -                       | -. -       | -. -                       | -. -       |
|               | 12.0         | 0.23                       | 0.50       | 0.27                       | 0.28       |
|               | 20.0         | 0.21                       | 0.34       | 0.23                       | 0.21       |
| -----         |              |                            |            |                            |            |
| Mittelwerte   | 6.0          | 0.23                       | 0.39       | 0.25                       | 0.40       |
|               | 12.0         | 0.23                       | 0.33       | 0.25                       | 0.37       |
|               | 20.0         | 0.23                       | 0.30       | 0.23                       | 0.39       |

quenzen eher überschätzt werden, liegen die Werte von  $f_1^{\text{DGL}}$  in Abhängigkeit von der Baumhöhe zum Teil über, zum Teil auch unter den gemessenen Grundswingungsfrequenzen. Mit Ausnahme der Kiefer (*Pinus sylvestris*) Nr. 11 weichen die berechneten Ei-

Tab. 29: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 7 im Forstenrieder Park

|              | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|--------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|              |              | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ |
| M2,30.5.1984 | 20.0         | 0.24                       | 0.20       | 0.24                       | 0.32       |
| M4,30.5.1984 | 20.0         | 0.24                       | 0.25       | 0.26                       | 0.35       |
| M7,30.5.1984 | 20.0         | 0.23                       | 0.51       | 0.27                       | 0.35       |
| Mittelwerte  | 20.0         | 0.24                       | 0.32       | 0.26                       | 0.34       |

genfrequenzen um weniger als 20 % von den gemessenen ab. Beim Baum Nr. 11 sind die Abweichungen geringfügig größer.

Diese relativ geringen Abweichungen sind umso erstaunlicher, als die Annahme, einen Baum als einseitig eingespannten, kreiszylindrischen Stab zu betrachten, doch erheblich von der tatsächlichen Gestalt eines Nadelbaumes abweicht. Weiterhin wird bei den Berechnungen vorausgesetzt, daß sich das Material homogen und isotrop verhält, wobei bei einer Auslenkung des Baumes die Hookesche Annahme der Proportionalität zwischen Spannung und Formänderung erfüllt sein soll (Olsson, 1942). Tatsächlich aber ist das natürliche Holz weder homogen noch isotrop. Außerdem wird auch das Hookesche Gesetz nur in einer gewissen Näherung erfüllt. Als weitere Unsicherheit kommt hinzu, daß bei den Berechnungen die Größe und die Verteilung des Astgewichtes sowie das Gewicht der Baumkrone nicht mitberücksichtigt worden sind. Wenn über diese Parameter nähere Angaben gemacht werden können, wird es möglich sein, die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Eigenfrequenzen zu minimieren und die Eigenfrequenzen eines Baumes in befriedigender Weise theoretisch zu ermitteln.

Tab. 30: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 11 im Hofoldinginger Forst

|               | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|---------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               |              | $f_{\max}$<br>in Hz        | $\delta T$ | $f_{\max}$<br>in Hz        | $\delta T$ |
| M6, 7.2.1984  | 4.5          | .-                         | .-         | .-                         | .-         |
|               | 9.0          | 0.26                       | 0.31       | 0.22                       | 0.34       |
|               | 15.0         | 0.26                       | 0.40       | 0.22                       | 0.50       |
| M9, 7.2.1984  | 4.5          | .-                         | .-         | .-                         | .-         |
|               | 9.0          | 0.24                       | 0.20       | 0.21                       | 0.25       |
|               | 15.0         | 0.21                       | 0.25       | 0.21                       | 0.32       |
| M10, 7.2.1984 | 4.5          | .-                         | .-         | .-                         | .-         |
|               | 9.0          | 0.24                       | 0.27       | 0.20                       | 0.26       |
|               | 15.0         | 0.21                       | 0.57       | 0.21                       | 0.59       |
| M2, 8.2.1984  | 4.5          | 0.22                       | 0.38       | 0.26                       | 0.28       |
|               | 9.0          | 0.26                       | 0.32       | 0.22                       | 0.38       |
|               | 15.0         | 0.22                       | 0.37       | 0.26                       | 0.33       |
| M4, 8.2.1984  | 4.5          | 0.21                       | 0.24       | 0.26                       | 0.39       |
|               | 9.0          | 0.26                       | 0.41       | 0.21                       | 0.25       |
|               | 15.0         | 0.21                       | 0.24       | 0.26                       | 0.23       |
| <hr/>         |              |                            |            |                            |            |
| Mittelwerte   | 4.5          | 0.22                       | 0.31       | 0.26                       | 0.34       |
|               | 9.0          | 0.25                       | 0.30       | 0.21                       | 0.30       |
|               | 15.0         | 0.22                       | 0.37       | 0.23                       | 0.39       |

Untersucht man die in Tab. 28 bis Tab. 33 zusammengestellten logarithmischen Dekremente  $\delta T$ , so zeigen sich bei den untersuchten Bäumen keine systematischen Unterschiede in ihren Dämpfungseigenschaften. So ist z.B. beim Baum Nr. 1 die Variationsbreite von  $\delta T$  für die longitudinale und laterale Baumauslenkungskomponente aus den drei Meßhöhen nahezu genauso groß wie die Unterschiede zwischen  $\delta T$  von den verschiedenen Ver-

Tab. 31: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 12 im Hofoldinginger Forst

|               | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|---------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               |              | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ |
| M6, 7.2.1984  | 15.0         | 0.22                       | 0.33       | 0.21                       | 0.36       |
| M9, 7.2.1984  | 15.0         | 0.21                       | 0.22       | 0.21                       | 0.28       |
| M10, 7.2.1984 | 15.0         | 0.21                       | 0.26       | 0.22                       | 0.26       |
| Mittelwerte   | 15.0         | 0.21                       | 0.27       | 0.21                       | 0.30       |

Tab. 32: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 30 im Ebersberger Forst

|              | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|--------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|              |              | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ | f <sub>max</sub><br>in Hz  | $\delta T$ |
| M1, 4.1.1984 | 14.5         | 0.19                       | 0.35       | 0.20                       | 0.25       |
|              | 24.5         | 0.19                       | 0.37       | 0.19                       | 0.32       |
| M3, 4.1.1984 | 14.5         | 0.19                       | 0.49       | 0.19                       | 0.42       |
|              | 24.5         | 0.19                       | 0.41       | 0.19                       | 0.27       |
| M4, 4.1.1984 | 14.5         | 0.19                       | 0.31       | 0.19                       | 0.37       |
|              | 24.5         | 0.18                       | 0.48       | 0.18                       | 0.31       |
| M5, 4.1.1984 | 14.5         | 0.19                       | 0.45       | 0.19                       | 0.43       |
|              | 24.5         | 0.19                       | 0.40       | 0.17                       | 0.50       |
| M8, 4.1.1984 | 14.5         | 0.19                       | 0.40       | 0.19                       | 0.40       |
|              | 24.5         | 0.18                       | 0.39       | 0.18                       | 0.42       |
| Mittelwerte  | 14.5         | 0.19                       | 0.40       | 0.19                       | 0.37       |
|              | 24.5         | 0.19                       | 0.41       | 0.18                       | 0.36       |

Tab. 33: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 31 im Ebersberger Forst

|              | Höhe<br>in m | y <sub>1</sub> -Komponente |            | y <sub>2</sub> -Komponente |            |
|--------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|              |              | $f_{\max}$<br>in Hz        | $\delta T$ | $f_{\max}$<br>in Hz        | $\delta T$ |
| M1, 4.1.1984 | 25.0         | 0.19                       | 0.32       | 0.20                       | 0.24       |
| M3, 4.1.1984 | 25.0         | 0.19                       | 0.31       | 0.20                       | 0.48       |
| M4, 4.1.1984 | 25.0         | 0.19                       | 0.31       | 0.20                       | 0.33       |
| M5, 4.1.1984 | 25.0         | 0.19                       | 0.48       | 0.19                       | 0.32       |
| M8, 4.1.1984 | 25.0         | 0.19                       | 0.33       | 0.19                       | 0.48       |
| Mittelwerte  | 25.0         | 0.19                       | 0.35       | 0.20                       | 0.37       |

suchsbäumen. Insofern läßt sich hier kein Zusammenhang zwischen dem forstlichen Stabilitätsparameter  $h/d$ -Wert und der Dämpfung der Nadelbäume feststellen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Mayhead et al. (1975), nach denen Bäume um so stabiler sind, je geringer ihre Dämpfung ist, müßten, ausgehend von den  $h/d$ -Werten, die beiden Bäume Nr. 30 und Nr. 31 aus dem Ebersberger Forst die niedrigsten logarithmischen Dekremente besitzen. Dies ist aber nicht der Fall, vielmehr liegen die Werte für  $\delta T$  bei diesen zwei Fichten (*Picea abies*) in der oberen Hälfte des Wertebereiches der hier ermittelten logarithmischen Dekremente, nämlich zwischen  $0.27 \leq \delta T \leq 0.41$ .

Obwohl anhand der vorliegenden Werte für die logarithmischen Dekremente der Versuchsbäume keine eindeutigen Zusammenhänge mit der Baumstabilität in bezug auf Windlasten erkennbar sind, wurden doch einige Schwierigkeiten deutlich, die bei der Beschreibung der Dämpfung eines Nadelbaumes auftreten. Dadurch ist auch bedingt, daß die Ergebnisse anderer Autoren (z.B. Mayhead et al., 1975; Holbo et al., 1980) nicht ohne Einschränkungen in dieser Arbeit übernommen werden können.

Aufgrund der komplizierten Baumformen ergibt sich die Gesamtdämpfung eines Baumes als Summe der Dämpfungsbeiträge verschiedenen Ursprungs, von denen die wichtigsten bei Mayhead et al. (1975) zusammengestellt sind und hier nochmals kurz erwähnt werden. Die gesamte Dämpfung eines Baumes setzt sich aus Beiträgen zusammen, die einerseits von den oberirdischen Baumorganen und andererseits von dem Komplex 'Wurzelung und Boden' hervorgerufen werden. Zur ersten Gruppe zählt die aerodynamische Dämpfung der Baumkronen, die auf die Veränderungen der strömungsmechanischen Eigenschaften einzelner Zweige in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Weiterhin bewirkt die zu der Stammbewegung phasenverschobene Bewegung der Äste der Baumkrone eine zusätzliche mechanische Dämpfung. Außerdem kommt im Bestand die Stützwirkung von Nachbarbäumen hinzu, wenn die Kronen der benachbarten Bäume mit unterschiedlichen Schwingungsdauern aneinanderschlagen.

Die Dämpfung im Boden beruht hauptsächlich auf den folgenden Faktoren: Einerseits wird die Dämpfung im Boden durch das Dehnen und Strecken der Wurzeln in sich selbst hervorgerufen, andererseits ist es sogar möglich, daß sich der gesamte Wurzelballen mit dem umwachsenen Boden bewegt. Von großer Bedeutung ist hier auch die Bodenelastizität, die größtenteils vom Wassergehalt im Boden abhängt. Insbesondere der letzte Faktor wurde in der Literatur schon mehrfach behandelt (z.B. Geiger, 1950; Hütte, 1983; Mayer, 1985).

## 9 Ergebnisse der Spektralmethode

Auf der Basis der in Abschnitt 5.2 dargestellten Spektral-  
methode ist es möglich, die Energieübertragung aus dem turbulen-  
ten Windfeld auf einen Baum näher zu analysieren. Da die Mes-  
sungen auf den drei Versuchsflächen vorwiegend während Stark-  
wind- oder Sturmlagen durchgeführt wurden, schwangen bei Meß-  
beginn die Versuchsbäume bereits um ihre Ruhelage, so daß nur  
das Verhalten des schwingenden Baumes im Windfeld untersucht  
werden konnte. Daher sind insbesondere Aussagen über den Ein-  
schwingvorgang der ausgewählten Nadelbäume nicht möglich.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden zur Charakterisie-  
rung des Windfeldes und der Baumreaktionen die dreidimensiona-  
len Windvektoren bzw. die horizontalen Baumauslenkungen ver-  
wendet. Als Maß für die wirkenden Windlasten wurde sodann aus  
den Windmessungen die spektrale Verteilung der Schubspannung  
 $P_T(f)$  berechnet. Analog hierzu wurden die longitudinalen und  
lateralen Spektren  $P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$  der Baumauslenkungen ermit-  
telt. Damit ergeben sich nach Gl. (59) die Beträge der mecha-  
nischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  zu:

$$|H_{m,j}(if)| = \sqrt{\frac{P_j(f)}{P_T(f)}} \quad , \quad j = y_1, y_2 \quad (107)$$

In den Abbildungen dieses Abschnittes sind neben den aus Meß-  
werten bestimmten Spektren der mechanischen Übertragungsfunk-  
tionen für jeden Baum auch die nach Gl. (73) berechneten Spek-  
tren von  $|H_{m,y}(if)|$  enthalten.

Eine Kennzeichnung der Windbelastung quer zur mittleren Wind-  
richtung, wie sie im Abschnitt 5.4 für einen Kreiszylinder  
theoretisch durchgeführt wurde, scheidet hier bei Nadelbäumen  
aus, weil die benötigten Größen nicht ausreichend genau abge-  
schätzt werden konnten. Im Vergleich hierzu war die Schubspan-  
nung relativ genau zu ermitteln, so daß eine Parametrisierung  
der Querbeltung der Nadelbäume durch die Schubspannung als  
gerechtfertigt erschien, obwohl dadurch nur prinzipielle Aus-

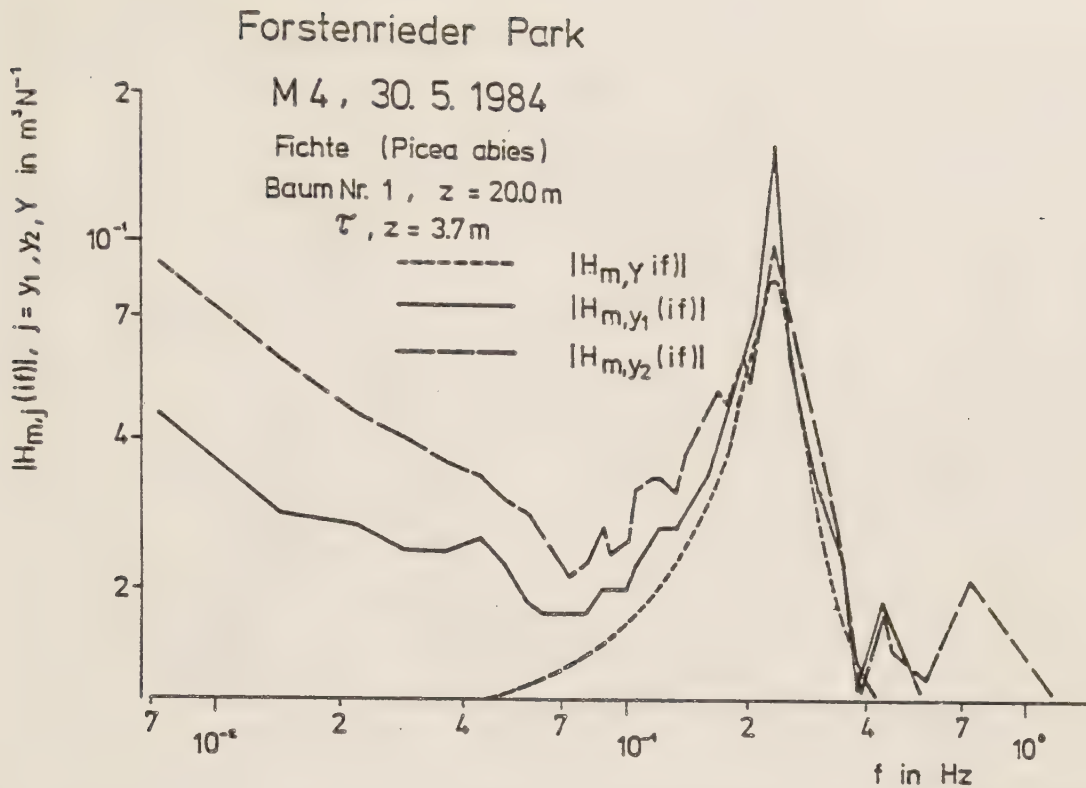


Abb. 52: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 1 (Fichte) im Forstenrieder Park

sagen zum Querschwingungsverhalten der untersuchten Bäume möglich waren.

In Abb. 52 bis Abb. 57 sind die Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen exemplarisch für jeden Versuchsbaum dargestellt. Zur Berechnung dieser Spektren wurden jeweils wieder die Baumauslenkungsspektren aus den obersten Meßhöhen jedes Baumes verwendet. Dabei wurden in den Abbildungen nur Beiträge zu den Spektren der  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  berücksichtigt, die in einem für die vorliegende Problematik sinnvollen Frequenzbereich lagen. Dies führte dazu, daß die Spektrenverläufe der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen in Abb. 52 bis Abb. 57 nicht immer bis  $f=1.25$  Hz eingezeichnet wurden. Insbesondere bei Frequenzen  $f > 1.00$  Hz fallen die Spektren der Schubspannung  $\tau$  sehr stark ab, so daß hier die Spektren der  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  bei unveränderli-

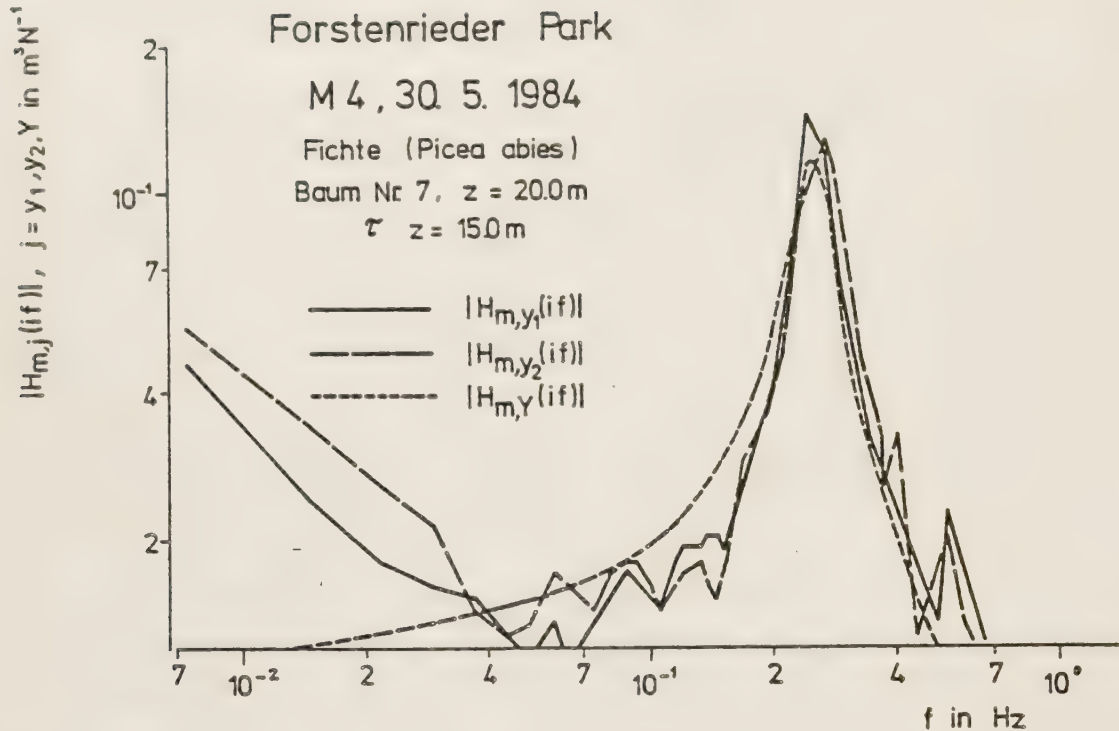


Abb. 53: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 7 (Fichte) im Forstenrieder Park

chen bzw. langsam abfallenden Amplituden der Baumauslenkungsspektren sehr hohe Werte annehmen können. Dies bedeutet, daß in diesem Frequenzbereich die Energieübertragung aus dem Windfeld auf die schwingenden Bäume zwar sehr hoch ist, was aber das Schwingungsverhalten der Bäume nur noch unwesentlich beeinflusst, da in diesem Frequenzbereich die im Windfeld enthaltene turbulente Energie zu gering ist. Andererseits nehmen im allgemeinen bei Frequenzen  $f > 1.00$  Hz die Varianzanteile der Baumauslenkungsspektren auch ab, was abnehmenden Schwingungsamplituden entspricht. Da mit geringeren Auslenkungen auch geringere Baumbelastungen verbunden sind, ist in dem Frequenzbereich  $f > 1.00$  Hz nicht mehr mit Baumwurf, der durch Biegeschwingungen induziert wurde, zu rechnen.

Der Verlauf der spektralen Verteilungen der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen in Abb. 52 bis Abb. 57 gibt

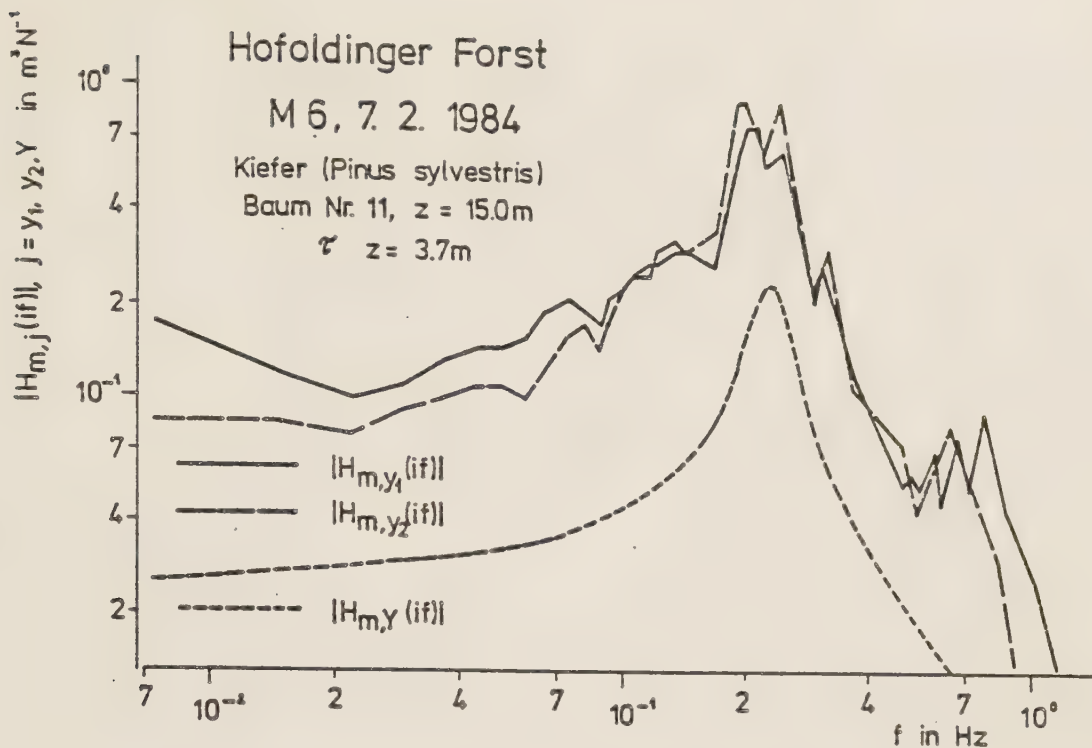


Abb. 54: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 11 (Kiefer) im Hofoldingner Forst

prinzipiell den Verlauf der Baumauslenkungsspektren wieder. So tritt bei allen Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  ein ausgeprägtes Maximum auf, dessen Frequenz mit der Grundswingungsfrequenz des jeweiligen Baumes ungefähr übereinstimmt.

Weiterhin ergeben sich bei allen untersuchten Nadelbäumen nur geringe Unterschiede zwischen den Spektren von  $|H_{m,y_1}(if)|$  und  $|H_{m,y_2}(if)|$ . Solche Abweichungen können grundsätzlich durch die asymmetrische Verteilung der Äste im Kronenbereich, durch die richtungsabhängige Wurzelung sowie durch die richtungsabhängige Biegesteifigkeit des Baumstammes erklärt werden. Letztere ist abhängig von der Ausbildung des Wurzelanlaufes bzw. leeseitiger Stützwurzeln sowie von den, von einer kreisförmigen Gestalt abweichenden Querschnitten der tatsächlichen Baumstäbe.

Zu Vergleichszwecken wurden für den Baum Nr. 1 (Abb. 52) und

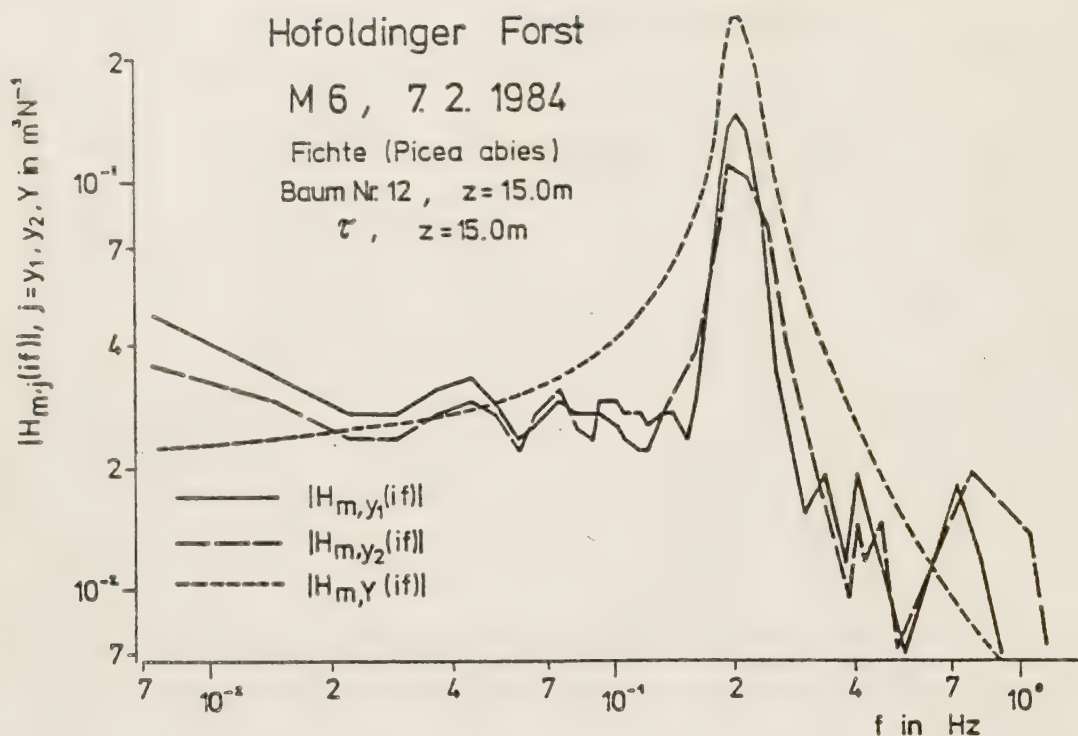


Abb. 55: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 12 (Fichte) im Hofoldinginger Forst

den Baum Nr. 11 (Abb. 54) die Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen mit den Schubspannungsspektren aus 3.7 m Höhe berechnet, während sonst jeweils die Schubspannungsspektren aus den obersten Höhen der Windmessungen verwendet wurden. Da bei allen Spektren der  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  die Baumauslenkungsspektren aus den obersten Meßhöhen jedes Baumes benutzt wurden, sind bei den Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  für die verschiedenen Versuchsbäume im Forstenrieder Park bzw. Hofoldinginger Forst die Unterschiede in den Ordinatenwerten neben den baumspezifischen Differenzen auch auf die unterschiedlichen  $f \cdot P_\tau(f)$  zurückzuführen.

Unter Berücksichtigung der in Abb. 41 und Abb. 42 dargestellten Zunahme der Varianzbeträge der Schubspannungsspektren mit ansteigender Höhe ergeben sich hier wegen Gl. (107) bei Verwendung von  $f \cdot P_\tau(f)$  aus 3.7 m Höhe zwangsläufig höhere Spek-

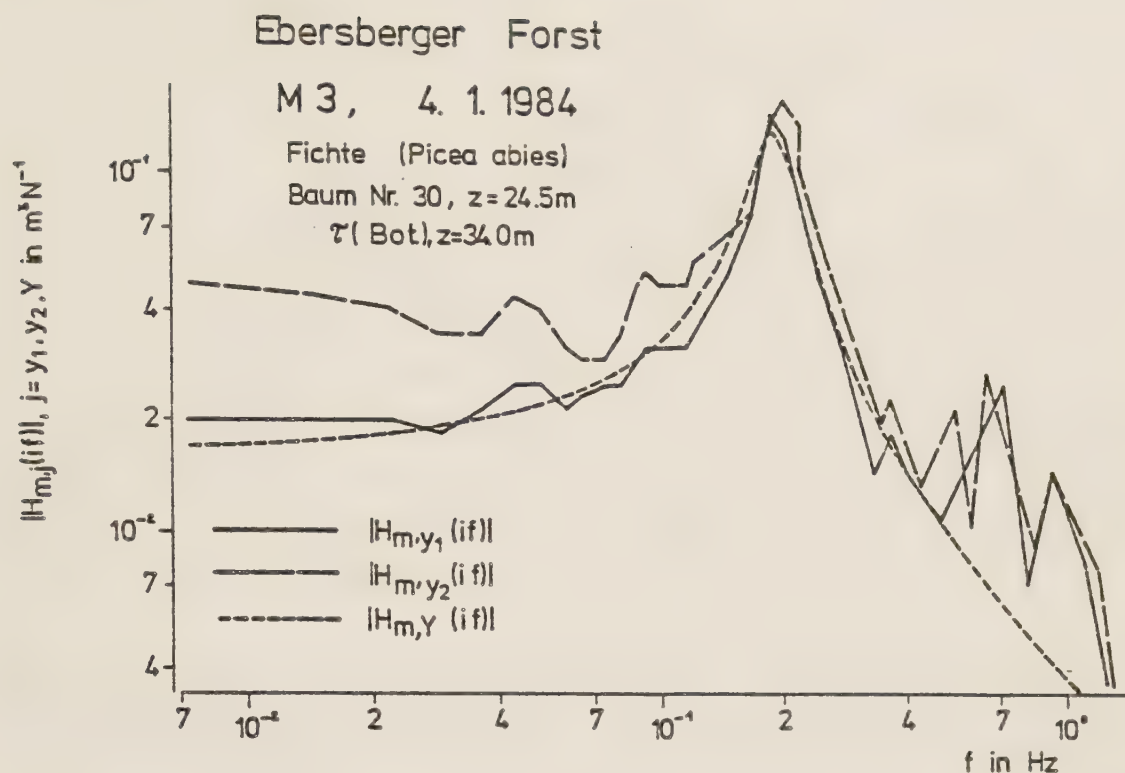


Abb. 56: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 30 (Fichte) im Ebersberger Forst

tralwerte für  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  als bei  $f \cdot P_\tau(f)$ . Diese Tendenz wird noch verstärkt durch die Zunahme der Auslenkungen eines Baumes mit zunehmender Höhe, was gleichzeitig die Spektralwerte der Auslenkungen erhöht und somit auch zu höheren Werten der Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  führt. Die Höhenabhängigkeit der Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen tritt im wesentlichen in der selben Form auch bei den Ergebnissen von Holbo et al. (1980) und Mayer (1985) auf.

Aus den Spektren für die Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen (Abb. 52 bis Abb. 57) kann man hinsichtlich der Energieübertragung vom turbulenten Windfeld auf einzelne Nadelbäume folgende Ergebnisse entnehmen: Die Spektramaxima von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  zeigen die Bereiche der Resonanzfre-

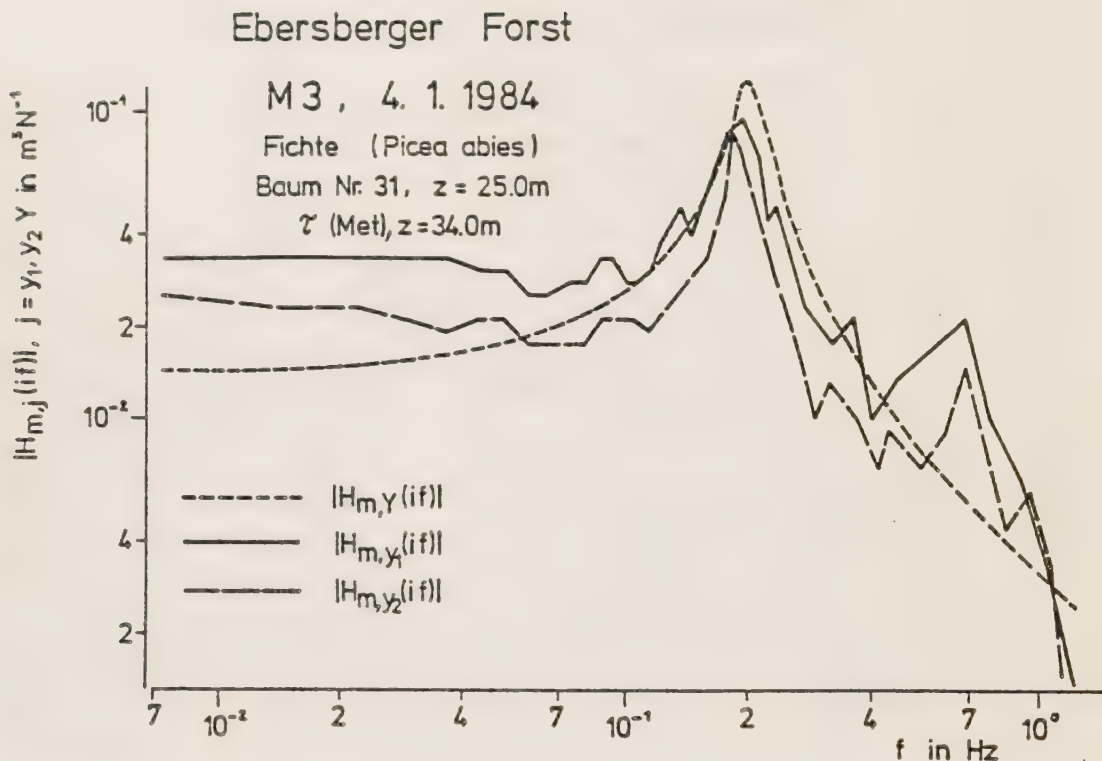


Abb. 57: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=Y_1, Y_2, Y$  für den Baum Nr. 31 (Fichte) im Ebersberger Forst

quenzen der untersuchten Versuchsbäume an. Durch das vorherrschende Maximum in den Spektren der  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=Y_1, Y_2$  im Bereich der Grundschwingungsfrequenz wird die überragende Bedeutung der Grundschwingung für die Baumschwingungen unterstrichen. In diesen Frequenzbereichen kann die im turbulenten Windfeld enthaltene Energie am besten von einem schwingenden Baum aufgenommen werden. Dadurch werden die Aussagen von Holbo et al. (1980) bestätigt, daß schwingende Bäume mit einem Bandpaßfilter verglichen werden können, d.h. nur in gewissen Frequenzbereichen in der Lage sind, Energie aus dem Windfeld aufzunehmen. Zu dem gleichen Ergebnis kam auch Maitani (1979) aufgrund seiner Messungen über Weizen- und Binsfeldern.

Der qualitativ ähnliche Verlauf der Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=Y_1, Y_2$  bei allen untersuchten Bäumen legte eine Parametrisie-

rung dieser Spektren nahe, wozu hier Gl. (73) benutzt wurde. Die auf diese Weise theoretisch ermittelten Spektren wurden für jeden Versuchsbaum mit der Projektionsfläche A seiner Baumkrone (Tab. 19) multipliziert und in Abb. 52 bis Abb. 57, mit  $|H_{m,Y}(if)|$  bezeichnet, als kurz gestrichelte Linien eingezeichnet. Diese Multiplikation war notwendig, um die theoretisch ermittelten Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen mit den über die Messungen bestimmten vergleichen zu können. Über Gl. (73) ließ sich nämlich nur die von den wirkenden Kräften hervorgerufene Auslenkung bestimmen, während hier die Summenwirkung aller auf die Baumkrone wirkenden Windkräfte, die durch die Schubspannung repräsentiert wird, benötigt wurde.

Die Berechnung von  $|H_{m,Y}(if)|$  über Gl. (73) erforderte die Kenntnis der Resonanzfrequenz  $f_r$ , des dimensionslosen Dämpfungsverhältnisses  $\Delta$  und der Biegesteifigkeit  $k_g$  der untersuchten Bäume. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse wurde anstelle der Resonanzfrequenz  $f_r$  der Mittelwert der Frequenzen  $f_{max}$  der Baumauslenkungsspektren aus den obersten Meßhöhen verwendet. Zur Parametrisierung des dimensionslosen Dämpfungsverhältnisses  $\Delta$  wurde das logarithmische Dekrement  $\delta T$ , das wie  $f_{max}$  für alle Versuchsbäume in Tab. 28 bis Tab. 33 zusammengestellt ist, benutzt. Den Zusammenhang zwischen  $\Delta$  und  $\delta T$  liefert Gl. (109), die mit  $T=1/f_r$  und Gl. (29) zunächst die folgende Form annimmt, wobei m die Baummasse und D die Dämpfungskonstante des Baumes bezeichnen:

$$\delta T = \frac{D}{2 \cdot m \cdot f_r} \quad (108)$$

Eliminiert man mit Gl. (31)  $f_r$  aus Gl. (108), so ergibt ein Vergleich mit Gl. (72) die gewünschte Beziehung:

$$\Delta = \frac{\delta T}{2 \cdot \pi} \quad (109)$$

Die Biegesteifigkeit  $k_g$  konnte mit Gl. (31) über die Resonanz-

frequenz  $f_r$  und die Baummasse  $m$  ermittelt werden:

$$k_S = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_r^2 \cdot m \quad (110)$$

Für die Masse  $m$  der Versuchsbäume wurden zur Berechnung der Spektren von  $|H_{m,Y}(if)|$  die in Tab. 19 enthaltenen Werte herangezogen.

Da die hier gezeigten Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  auf der Basis von Messungen ermittelt worden sind, spiegeln sie in ihrem Kurvenverlauf die spezifischen Umgebungsbedingungen während der Messungen und die morphologischen Besonderheiten des jeweiligen Einzelbaumes wieder. Dies führt dazu, daß durch die Spektren von  $|H_{m,Y}(if)|$  die Kurvenverläufe der Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  bei Frequenzen  $f < 0.04$  Hz nur unzureichend wiedergegeben werden. In diesem Bereich werden die spektralen Varianzbeiträge von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  im allgemeinen unterschätzt, was allerdings für die Beschreibung der dynamischen Windbelastung von Nadelbäumen keine schwerwiegenden Folgen hat. Der Frequenzbereich  $f < 0.04$  Hz entspricht nämlich einem Zeitbereich  $t > 25$  s, in dem die Windbelastung der Nadelbäume nur noch statisch ist. So können Nadelbäume z.B. durch 25 s dauernde Böen nicht mehr zu Biegeschwingungen angeregt werden, weil die Schwingungsdauern von Nadelbäumen im Durchschnitt weniger als 6 s betragen.

Da bei der Berechnung der Spektren von  $|H_{m,Y}(if)|$  als einzige Frequenz die Resonanzfrequenz  $f_r$  eingeht, werden durch diese Spektren Peaks bei höheren Frequenzen, die z.B. die Frequenz der 1. Oberschwingung anzeigen, nicht wiedergegeben. Wie aus Abb. 52 bis Abb. 57 zu entnehmen ist, beschreiben bei allen untersuchten Fichten die Spektren von  $|H_{m,Y}(if)|$  im Frequenzbereich  $f > 0.4$  Hz den Spektrenverlauf von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  nicht mehr hinreichend gut. Mit Ausnahme der Fichte Nr. 12 im Hofoldinger Forst, für sie gilt die Aussage erst für Frequenzen  $f > 0.6$  Hz, wurden auch hier die spektralen Varianzbeiträge von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  im Mittel unterschätzt. Dies bedeutet,

daß in der Natur die Energieübertragung aus dem turbulenten Windfeld auf die schwingenden Bäume besser als die theoretisch ermittelte ist.

Im Bereich  $0.04 \text{ Hz} < f < 0.40 \text{ Hz}$  werden bei den Versuchsbäumen im Forstenrieder Park und im Ebersberger Forst die Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  gut durch die Spektren von  $|H_{m,Y}(if)|$  beschrieben. Insbesondere stimmt bei der Resonanzfrequenz  $f_r$  die Höhe des Spektrenmaximums von  $|H_{m,Y}(if)|$ , die eine Funktion der Biegesteifigkeit  $k_S$  und des dimensionslosen Dämpfungsverhältnisses  $\Delta$  ist, hervorragend mit den Spektrenmaxima von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  überein. Gleichzeitig werden auch der Anstieg und der Abfall zum bzw. vom Maximum der aus den Meßwerten berechneten Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen gut durch die theoretisch ermittelten Spektren wiedergegeben.

Bei den untersuchten Nadelbäumen im Hofoldinginger Forst werden die Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  durch Gl. (73) nicht so gut beschrieben wie bei den Bäumen auf den beiden anderen Versuchsflächen. Bei der Fichte Nr. 12 (Abb. 53) liegen im Bereich  $0.05 \text{ Hz} < f < 0.60 \text{ Hz}$  die Spektralwerte von  $|H_{m,Y}(if)|$  immer über den entsprechenden Werten der Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$ . Dies läßt sich u.a. damit erklären, daß das zur Berechnung von  $|H_{m,Y}(if)|$  verwendete Dämpfungsverhältnis und die Biegesteifigkeit zu klein sind, um die tatsächlichen Materialeigenschaften des Baumes ausreichend wiederzugeben.

Bei der Kiefer Nr. 11 im Hofoldinginger Forst (Abb. 54) erreichen im gesamten untersuchten Frequenzbereich die theoretisch ermittelten Spektralwerte der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktion nie die Höhe der Werte der über die Messungen bestimmten Spektren. Durch Gl. (73) wird lediglich der prinzipielle Kurvenverlauf gut approximiert. Wollte man die im Vergleich zu den anderen Versuchsbäumen mangelhafte Parametrisierung der Kurvenverläufe der Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$

allein auf ein falsch gewähltes Dämpfungsverhältnis zurückführen, so müßte z.B. der Wert von  $\Delta$  um ca. 80 % reduziert werden, um eine hinreichend gute Übereinstimmung des Spektrums von  $|H_{m,y}(if)|$  mit den beiden über Messungen ermittelten Spektren in Abb. 54 zu gewährleisten. Diese Reduktion des Wertes von  $\Delta$  entspricht andererseits einer Multiplikation der Spektralwerte von  $|H_{m,y}(if)|$  um den Faktor 5. Dieser Faktor trat jedoch schon in Abschnitt 8.3 beim Vergleich der Baumauslenkungsspektren der Fichte Nr. 7 mit denen dieser Kiefer auf. Wegen der schon dort angeführten Tatsache, daß im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur eine Kiefer untersucht wurde, kann hier nicht geklärt werden, ob das in ihren Spektren der Baumauslenkungen und der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen wiedergegebene Verhalten baumartenspezifisch oder nur spezifisch für diesen Einzelbaum ist.

Für das Verhalten dieser Kiefer als Einzelbaum bietet sich folgende Erklärung an, wobei ausgehend von der durch die Autobahnnähe bedingten hohen Schadstoffbelastung im Hofoldingener Forst eine starke Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften dieses Baumes angenommen wird. So ist z.B. eine im Vergleich zur Rohdichte  $\rho_r$  des Kiefernholzes deutlich geringere tatsächliche Holzdichte denkbar, die dann ihrerseits zu einer geringeren tatsächlichen Baummasse  $m$  in Tab. 19 führt. Über Gl. (110) bedingt dies wiederum eine geringere Biegesteifigkeit  $k_s$ , was höhere Spektralwerte von  $|H_{m,y}(if)|$  zur Folge hat. Berücksichtigt man wegen der starken Auflichtung der Krone dieser Kiefer zusätzlich eine grobe Unterschätzung der tatsächlichen Kronenprojektionsfläche durch die hier verwendete, so erklärt auch dies einen Teil der im Vergleich zu den Spektren von  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2$  zu geringen Spektralwerte von  $|H_{m,y}(if)|$ .

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen bei Fichten im Bereich der Resonanzfrequenzen gut über Gl. (73) parametrisiert werden können. Dabei hat sich ergeben, daß mit zunehmender Biegesteifigkeit  $k_s$  und zunehmendem Dämpfungsverhältnis  $\Delta$  auch die Höhe

des Maximums dieser Spektren zunimmt, was einer verbesserten Energieübertragung aus dem turbulenten Windfeld auf den Einzelbaum im Bereich der Resonanzfrequenz entspricht. Mit anderen Worten ist also eine Fichte mit großer Biegesteifigkeit und hoher Dämpfung weitaus höheren dynamischen Windbelastungen ausgesetzt als eine Fichte mit den umgekehrten Eigenschaften. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Mayhead et al. (1975) überein, nach denen Bäume um so labiler sind, je höher ihre Dämpfung ist.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Dämpfung einer Fichte und ihrem  $h/d$ -Wert konnte in dieser Arbeit nicht gefunden werden. Es zeigte sich allerdings, daß die Fichten mit den höchsten  $h/d$ -Werten auch die höchsten Spektralwerte in ihren Auslenkungsspektren aufwiesen, was gleichzeitig auch den weitesten Auslenkungen entsprach. Damit konnte die bekannte forstliche Regel bestätigt werden, daß ein Nadelbaum um so stabiler ist, je niedriger sein  $h/d$ -Wert ist.

## 10      Schlußfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde die Windbelastung von Nadelbäumen hauptsächlich bei Sturmlagen untersucht, um die wesentlichsten physikalischen Zusammenhänge bei der Sturmgefährdung eines Nadelbaumes und damit bei Sturmschäden im Wald näher zu beschreiben. Die bisherigen Arbeiten zur Erklärung der Sturmschäden im Wald gingen im allgemeinen von statischen Windlasten aus, wobei aber wiederholt auf die Bedeutung der dynamischen Windbelastung für die Sturmschadensproblematik hingewiesen wurde. In Ergänzung zu der hinreichend bekannten statischen Windbelastung von Nadelbäumen wurden bei dieser Untersuchung jedoch die Reaktionen von ausgewählten Bäumen bei böigen Windverhältnissen ermittelt.

Dieses Aufgabengebiet hat ausgeprägt interdisziplinären Charakter. Dementsprechend müssen Methoden und Ergebnisse aus der Grenzschichtmeteorologie zur Beschreibung der Windturbulenz in und über Wäldern sowie waldbauliche und ertragskundliche Erfahrungen zur Beschreibung von Beständen bzw. von Einzelbäumen verwendet werden. Zusätzlich sind zur Abschätzung der Wirkung der dynamischen Windlasten auf Nadelbäume Methoden der Zufallsschwingungstheorie, wie sie u.a. in der Gebäudeaerodynamik verbreitet sind, und umfangreiche statistische Kenntnisse notwendig.

Die Bearbeitung der vorliegenden Problematik erfolgte auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen an drei verschiedenen Standorten in der Umgebung Münchens. An jedem Standort wurde jeweils das Verhalten von zwei Nadelbäumen ermittelt, wobei im gesamten fünf Fichten (*Picea abies*) und eine Kiefer (*Pinus sylvestris*) ausgewählt worden waren. Diese ungleiche Aufteilung der Anzahl der Versuchsbäume auf die beiden Baumarten trug der Bedeutung der Fichte (*Picea abies*) Rechnung, die häufig als "Brotbaum der deutschen Forstwirtschaft bezeichnet worden ist (Oehler, 1967).

Es zeigte sich, daß bei Verwendung der Spektralmethode die wirkenden dynamischen Windlasten besser durch Schubspannungsspektren als durch Winddruckspektren beschrieben werden können, obwohl letztere in der Gebäudeaerodynamik gewöhnlich dafür verwendet werden. Außerdem ist es ausreichend, wenn die spektrale Verteilung der Schubspannung in einer Höhe bekannt ist, wobei sich für Aussagen, die sich auf Bäume in Beständen beziehen, Höhen, die größer als die Bestandshöhe sind, als am geeignetsten erwiesen haben. Entsprechendes gilt auch für die Baumreaktionen, bei denen die Stammauslenkungen in Höhe des Kronenschwerpunktes das Schwingungsverhalten des betreffenden Baumes hinreichend gut charakterisieren.

Die grobe Annäherung des Biegeschwungsverhaltens eines Baumes durch das Schwingungsverhalten eines einseitig eingespannten, kreiszylindrischen Stabes mit höhenkonstanten Materialeigenschaften hat für den Bereich der Grundschnwingungsfrequenzen der untersuchten Nadelbäume befriedigende Ergebnisse geliefert. Eine Verbesserung der bisherigen Ergebnisse ist zu erwarten, wenn der Einfluß der natürlichen Wurzelung auf die Einspannung des Baumes im Boden und die höhenabhängige Variation der Eigenschaften der oberirdischen Baumorgane berücksichtigt werden. Um forstwirtschaftlich relevante Aussagen zur Sturmgefährdung der Wälder zu erhalten, sollten zusätzlich die Auswirkungen der Interferenzerscheinungen zwischen benachbarten Bäumen abgeschätzt werden.

Es erscheint zudem aus meteorologischer Sicht wünschenswert, auf der Grundlage allgemein zugänglicher meteorologischer Daten, wie sie z.B. vom Deutschen Wetterdienst für sein Stationsnetz verbreitet werden, potentiell sturmschadensgefährdete Gebiete auszuweisen. Im Zusammenhang mit bodenkundlichen Karten sollte dann mit dem angesprochenen Schwingungsmodell in Abhängigkeit von der Bestandsstruktur eine Vorhersage des maximal zu erwartenden Schadens in einem bestimmten Zeitraum möglich sein.

## Literatur

- Abetz, P., 1976: Beiträge zum Baumwachstum: Der h/d-Wert - mehr als ein Schlankheitsgrad. Der Forst- und Holzwirt 19, 389-393.
- Acheson, D.T., 1970: Response of cup and propeller rotors and wind direction vanes to turbulent windfields. Meteorol. Monogr. 11, 252-261.
- Allen, L.H., 1968: Turbulence and wind speed spectra within a Japanese larch plantation. J. Appl. Meteorol. 7, 73-78.
- Amtmann, R., 1981: Die Windböigkeit an der Bestandsoberhöhe eines Fichtenwaldes. Diplomarbeit Univ. München.
- Amtmann, R., 1982: Einige Turbulenzspektren an der Bestands- oberhöhe eines Fichtenwaldes. Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B, 31, 391-404.
- Amtmann, R., 1985: Data acquisition system for wind induced tree vibration. In: B.A. Hutchison und B.B. Hicks (eds.), The forest - atmosphere interaction, D. Reidel Publ., Dordrecht, 149-159.
- Assmann, E., 1960: Form- und Zuwachsveränderungen von Nadelbäumen an freigestellten Bestandsrändern. Mitt. Bay. Staatsforstverw., Nr. 31, 16-31.
- Assmann, E., 1961: Waldertragskunde. BLV: München.
- Baines, G.B.K., 1972: Turbulence in a wheat crop. Agric. Meteorol. 10, 93-105.
- Baldocchi, D.D.; S.B. Verma; N.J. Rosenberg, 1983: Characteristics of air flow above and within Soybean canopies. Boundary-Layer Meteorol. 25, 43-54.
- Bargmann, B.A., 1904: Verteidigung der Wälder gegen die Angriffe und die Gewalt der Stürme unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Windablenkungen. AFJZ, 81-89, 121-139, 161-177, 201-216, 241-257.

- Baumgartner, A., 1955: Licht und Naturverjüngung am Nordrand eines Waldbestandes. Forstw. Cbl. 74, 59-64.
- Baumgartner, A., 1956: Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Ber. DWD 5, Nr. 28.
- Baumgartner, A., 1961: Baum und Wald im Windfeld. AFZ 16, 228-229.
- Baumgartner, A., 1969: Meteorological approach to the exchange of CO<sub>2</sub> between the atmosphere and vegetation, particularly forest stands. Photosynthetica 3, 127-149.
- Baumgartner, A., 1971: Der Wald als Austauschfaktor in der Grenzschicht Erde/Atmosphäre. Forstw. Cbl. 90, 174-182.
- Bendat, J.S. und A.G. Piersol, 1966: Measurement and analysis of random data. J. Wiley & Sons: New York.
- Bergen, J.D., 1971: Vertical profile of windspeed in a pine stand. For. Sci. 17, 314-321.
- Bibelriether, H., 1964: Unterschiedliche Wurzelbildung bei Kiefern verschiedener Provenienzen. Forstw. Cbl. 83, 129-140.
- Blackman, H.B. und I.W. Tukey, 1958: The measurement of power spectra. Dover Publ.: New York.
- Booz, G. und G.I. Schueller, 1981: Die Beschreibung der Windlast im Rahmen eines probabilistischen Sicherheitskonzepts. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes. Heft 17, 63-112.
- Bronstein, I.N. und K.A. Semendjajew, 1976: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch: Frankfurt/Main.
- Burger, H., 1939 a: Der Kronenaufbau gleichalteriger Nadelholzbestände. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers. 21, 5-57.
- Burger, H., 1939 b: Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers. 21, 147-176.

- Burger, H., 1953: Holz, Blattmenge und Zuwachs; Fichten im gleichalterigen Hochwald. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Vers. 29, 38-130.
- Busch, N.E. und H.A. Panofsky, 1968: Recent spectra of atmospheric turbulence. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 94, 132- 148.
- Busch, N.E., 1973: The surface boundary layer. Boundary-Layer Meteorol. 4, 213-240.
- Camp, D.W.; R.E. Turner; L.P. Gilchrist, 1970: Response tests on cup, vane and propeller wind sensors. J. Geophys. Res. 75, 5265-5270.
- Cincotta, J.J.; G.W. Jones; R.W. Walker, 1969: Experimental investigations of wind induced oscillation effects on cylinders in two-dimensional flow at high Reynolds numbers. Meet. Ground Wind Load Prob. Rel. Launch Veh., NASA Langley Res. Cen., NASA TR R-300, 20.1-20.35.
- Cionco, R.M., 1972 a: Intensity of turbulence within canopies with simple and complex roughness elements. Boundary-Layer Meteorol. 2, 453-465.
- Cionco, R.M., 1972 b: A wind-profile index for canopy flow. Boundary-Layer Meteorol. 3, 255-263.
- Cionco, R.M., 1983: Canopy flow modeling and its applications. Atmos. Sci. Lab., White Sands, N.M., 203-213.
- Cooper, K.R. und D. Surry, 1975: The bending moment response of a cantilevered circular cylinder in turbulent flow. Proc. 4th Int. Conf. Wind Effects Build. Struct., London.
- Counihan, J., 1975: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880 - 1972. Atmos. Environ. 9, 871-905.
- Davenport, A.G., 1961: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 87, 194-211.

- Davis, F.K. und H. Newstein, 1968: The variation of gust factors with mean wind speed and with height. J. Appl. Meteorol. 7, 372-378.
- Deacon, E.A., 1955: Gust variation with height up to 150 m. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 81, 562-573.
- von Droste zu Hülshoff, B., 1969: Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen. Diss. Univ. München.
- Fiedler, F., 1970: Klimawerte zur Temperatur- und Windschichtung in den untersten 50 m der Atmosphäre. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München, Nr. 18.
- Finnigan, J.J. und P.J. Mulhearn, 1978: Modelling waving crops in a wind tunnel. Boundary-Layer Meteorol. 14, 253-277.
- Finnigan, J.J., 1979 a: Turbulence in waving wheat. - I. Mean statistics and Honami. Boundary-Layer Meteorol. 16, 181-211.
- Finnigan, J.J., 1979 b: Turbulence in waving wheat. - III. Structure of momentum transfer. Boundary-Layer Meteorol. 16, 213-236.
- Försching, H.W., 1974: Grundlagen der Aeroelastik. Springer-Verlag: Berlin.
- Fons, W.L., 1940: Influence of forest cover on wind velocity. J. For. 39, 481-486.
- Francey, R.J. und K. Sahashi, 1979: Gill propeller anemometer frequency response over the sea. J. Appl. Meteorol. 18, 1083-1086.
- Franz, F., 1971: Massentafeln für Fichte und Kiefer. München.
- Fraser, A.I., 1962: The soil and roots as factors in tree stability. Forestry 35, 117-127.
- Fraser, A.I., 1964: Wind tunnel and other related studies on coniferous trees and tree crops. Scot. Forestry 18, 84-92.

- Fraser, A.I. und J.B.H. Gardiner, 1967: Rooting and stability in Sitka spruce. Forestry Commission Bulletin Nr. 40.
- Freytag, C., 1976: Statistische Eigenschaften der Energiedissipation. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München, Nr. 27.
- Fritschen, L.J. und L.W. Gay, 1979: Environmental instrumentation. Springer-Verlag: New York
- Fritzsche, K., 1929: Physiologische Windwirkung auf Bäume. Diss. Forstl. Hochschule Tharandt.
- Fritzsche, K., 1933: Sturmgefahr und Anpassung. Thar. Forstl. Jb. 84, 1-94.
- Fung, Y.C., 1960: Fluctuating lift and drag action on a cylinder in a flow at supercritical Reynolds numbers. J. Aerospace Sci. 27, 801-814.
- Garratt, J.R., 1975: Limitations of the eddy-correlation technique for the determination of turbulent fluxes near the surface. Boundary-Layer Meteorol. 8, 255-259.
- Geiger, R., 1926: Untersuchungen über das Bestandsklima III. Forstw. Cbl. 48, 337-349.
- Geiger, R., 1950: Die meteorologischen Voraussetzungen der Sturmgefährdung. Forstw. Cbl. 69, 71-81.
- Geiger, R. 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Vieweg-Verlag: Braunschweig.
- Gerthsen, Chr.; H.O. Kneser; H. Vogel, 1974: Physik. Springer-Verlag: Berlin.
- Gnedenko, B.W., 1958: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Akademie-Verlag: Berlin.
- Göhre, K., 1961: Werkstoff Holz. VEB-Fachbuchverlag: Leipzig.
- Grimm, E., 1968: Zusammenhang zwischen Böigkeitskenngrößen und Turbulenzspektren. Inst. Meteorol. TH Darmstadt, Forschungsvorhaben T 748-I-203.

- Hager, H., 1975: Kohlendioxidkonzentrationen, -flüsse und -bilanzen in einem Fichtenhochwald. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 26.
- Heger, A., 1953: Die Sicherung des Fichtenwaldes gegen Sturm-schäden. Neumann-Verlag: Berlin.
- Hennemuth, B., 1978: Statistical description of anisotropic and inhomogeneous turbulence. Boundary-Layer Meteorol. 15, 489-506.
- Hicks, B.B., 1972: Propeller anemometers as sensors of atmospheric turbulence. Boundary-Layer Meteorol. 3, 214-228.
- Hino, M., 1971: Spectrum of gusty winds. Proc. 3rd Int. Conf. Wind Effects Build. Struct., Tokio.
- Hintikka, V., 1972: Wind-induced root movements in forest trees. Comm. Inst. For. Fenniae 76, 1-56.
- Hirsch, H., 1979: Herabminderung winderregter Schwingungen durch Dämpfungsmaßnahmen. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 13, 127-146.
- Hirtz, H., 1981: Bericht über den Stand der Arbeiten an Regeln zur Erfassung der Windwirkung auf Bauwerke. Kon-struktiver Ingenieurbau - Ber. 35/36, 159-173.
- Holbo, H.R.; T.C. Corbett; P.J. Horton, 1978: Wind induced motions of individual Douglas-fir. Prepr. 5th Nat. Conf. Fire and Forest Meteorol., AMS, 79-83.
- Holbo, H.R.; T.C. Corbett; P.J. Horton, 1980: Aeromechanical behavior of selected Douglas-fir. Agric. Meteorol. 21, 81-91.
- Horst, T.W., 1973: Corrections for response errors in a three-component propeller anemometer. J. Appl. Meteorol. 12, 716-725.
- Hottinger Baldwin, 1976: Bedienungsanleitung für Beschleunigungsnehmer B12. Darmstadt.

- Hütte, P., 1967: Die standörtlichen Voraussetzungen der Sturm-  
schäden. Forstw. Cbl. 86, 276-295.
- Hütte, P., 1983: Die Absicherung angebrochener Fichtenbestans-  
ränder gegen Sturmschäden in Abhängigkeit von Durch-  
forstungsstärke und Standort. Forstw. Cbl. 102,  
343-349.
- Ingenieurschule für Holztechnologie, 1970: Handbuch der Holz-  
technologie. VEB-Fachbuchverlag: Leipzig.
- Inoue, K.; Z. Uchijima; T. Horie; S. Iwakiri, 1975: Studies  
of energy and gas exchange within crop canopies (10):  
Structure of turbulence in rice crop. J. Agric. Me-  
teorol. (Tokio) 31, 71-82.
- Isobe, S., 1972: A spectral analysis of turbulence in a corn  
canopy. Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. (Japan), Ser.  
A, Nr. 19, 101-113.
- Jehle, A., 1968: Die Parameter des vertikalen logarithmischen  
Windprofils über verschiedenen Pflanzenbeständen.  
Diplomarbeit Univ. München.
- Jenkins, G.M. und D.G. Watts, 1968: Spectral analysis and its  
applications. Holden-Day: San Francisco.
- Jones, H.G., 1983: Plants and microclimate. University Press:  
Cambridge.
- Kaimal, J.C.; J.C. Wyngaard; Y. Izumi; O.R. Coté, 1972: Spec-  
tral characteristics of surface-layer turbulence.  
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 98, 563-589.
- Kaimal, J.C., 1973: Turbulence spectra, length scales and struc-  
ture parameters in the stable surface layer. Boundary-  
Layer Meteorol. 4, 289-309.
- von Kármán, T. und H. Rubach, 1912: Über den Mechanismus des  
Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. Phys. Zeitschr.  
13, 49-59.
- Klemmer, L., 1969: Periodik des Radialzuwachses in einem Fich-  
tenwald und deren meteorologische Steuerung. Wiss.  
Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München, Nr. 17.

- Knigge, W. und W. Schulz, 1966: Grundriß der Forstbenutzung. Parey-Verlag: Hamburg.
- Köstler, J.N., 1956: Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken sturmgeworfener Nadelbäume. Forstw. Cbl. 75, 65-91.
- Köstler, J.N.; E. Brückner; H. Biebelriether, 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. Parey-Verlag: Hamburg.
- Kollmann, F. und H. Krech, 1960: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. HaRuW 18, 41-54.
- Kraus, H., 1970: Die Energieumsätze in der bodennahen Atmosphäre. Ber. DWD 16, Nr. 117, Offenbach.
- Kremser, W., 1977: Dokumentation der Sturmkatastrophe vom 13. November 1972 - Teil I: Darstellung des Schadensereignisses. Aus dem Walde, Heft 27, 10-23.
- Laitakari, E., 1929: Über die Fähigkeit der Bäume sich gegen Sturmgefahr zu schützen. Acta For. Fenn. 34, 1-29.
- Landsberg, J.J. und G.B. James, 1971: Wind profiles in plant canopies: Studies on a analytical model. J. Appl. Meteorol. 8, 729-741.
- Landsberg, J.J. und P.G. Jarvis, 1973: A numerical investigation of the momentum balance of a spruce forest. J. Appl. Ecol. 10, 645-655.
- Lavers, G.M., 1967: The strength properties of timber. For. Prod. Res. Bull. 50.
- Lettau, H.H. und B. Davidson, 1957: Exploring the atmospheres first mile, Vol. 1. Pergamon Press: London.
- Lumley, J.L. und H.A. Panofsky, 1964: The structure of atmospheric turbulence. J. Wiley & Sons: New York.
- MacBean, G.A., 1974: The turbulent transfer mechanisms: A time domain analysis. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 100, 53-66.

- MacCready, P.B., 1966: Mean wind measurements in turbulence. J. Appl. Meteorol. 5, 219-225.
- MacCready, P.B. und H.R. Jex, 1964: Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. J. Appl. Meteorol. 3, 182-193.
- Maitani, T., 1979: A comparison of turbulence statistics in the surface layer over plant canopies with those over several other surfaces. Boundary-Layer Meteorol. 17, 213-222.
- Maki, T., 1979: Vertikal profiles of wind turbulence in Teosinte and Sorgo canopies. J. Agric. Meteorol. (Tokio) 35, 133-143.
- Maurer, E., 1982: 25 Jahre Sturm- und Schneeschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1953/54 bis 1977/78). AFZ 37, 395-397.
- Mayer, H., 1976: Die Windverhältnisse in und über einem Fichtenwald. Forstw. Cbl. 95, 333-345.
- Mayer, H., 1979: Zu Wind und Baumschwingungen. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 35, 66-71.
- Mayer, H., 1981: Die Windböigkeit an der Baumoberhöhe in einem Fichtenwald. Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B, 29, 181-190.
- Mayer, H., 1985: Baumschwingungen und Sturmgefährdung des Waldes. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 51.
- Mayer, H. und R. Amtmann, 1983: Einfache Kennwerte der Windböigkeit über einem Fichtenhochwald. Agric. Meteorol. 28, 129-141.
- Mayhead, G.J., 1973 a: Sway periods of forest trees. Scot. For. 27, 19-23.
- Mayhead, G.J., 1973 b: Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. Agric. Meteorol. 12, 123-130.

- Mayhead, G.J.; J.B.H. Gardiner; D.W. Durrant, 1975: A report on the physical properties of conifers in relation to plantation stability. For. Comm., North. Res. Sta., Edinburgh.
- Meroney, R.N., 1968: Characteristics in and above model forests. J. Appl. Meteorol. 7, 143-158.
- Metzger, K., 1893: Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume. MÜFH 3, 35-86.
- Mitscherlich, G., 1970: Wald, Wachstum und Umwelt, Band 1; Form und Wachstum von Baum und Bestand. Sauerländer's Verlag: Frankfurt/Main.
- Mitscherlich, G., 1974: Sturmgefahr und Sturmsicherung. Schweiz. Zeitschr. Forstwes. 125, 199-216.
- Mitscherlich, G., 1981: Wald, Wachstum und Umwelt, Band 2: Waldklima und Wasserhaushalt. Sauerländer's Verlag: Frankfurt/Main.
- Monin, A.S. und A.M. Yaglom, 1971: Statistical fluid mechanics: Mechanics of turbulence, Vol. 1. MIT-Press: Cambridge.
- Monin, A.S. und A.M. Yaglom, 1975: Statistical fluid mechanics: Mechanics of turbulence, Vol. 2. MIT-Press: Cambridge.
- Monna, W.A.A. und A.G.M. Driedonks, 1979: Experimental data on the dynamic properties of several propeller vanes. J. Appl. Meteorol. 18, 699-702.
- Monteith, J.L., 1978: Grundzüge der Umweltphysik. Steinkopff Verlag: Darmstadt.
- Müller, G., 1957: Untersuchungen über die Querschnittsformen der Baumschäfte, 1. Mitt.. Forstw. Cbl. 76, 34-54.
- Müller, G., 1958: Untersuchungen über die Querschnittsformen der Baumschäfte, 2. Mitt.. Forstw. Cbl 77, 41-59.
- Nakagawa, K., 1965: An experimental study of aerodynamic devices for reducing wind induced oscillatory tendencies of stacks. Proc. Wind Effects Build. Struct., Vol. 2, London, 774-795.

- Nielsen, C.N., 1985: Eine quantitative Untersuchung über den Einfluß der Durchforstung auf die Sturmfestigkeit der Fichte in Norddeutschland und Dänemark. Unveröff. Manuskript, Univ. Göttingen.
- Nieser, H., 1974: Schwingungsberechnung turmartiger Bauwerke bei Belastung durch böigen Wind. Diss. TH Karlsruhe.
- Obukhov, A.M., 1941: Energy distribution in the spectrum of a turbulent flow. Izvestiya AN SSSR, Ser. geogr. geofiz., Nr. 4-5, 453-466.
- Oehler, H., 1967: Die Sturmgefährdung der Fichte. AFZ 22, 312-313.
- Oke, T.R., 1978: Boundary layer climates. Methuen: London.
- Oliver, H.R. und G.J. Mayhead, 1974: Wind measurements in a pine forest during a destructive gale. Forestry 47, 185-195.
- Olsson, R.G., 1942: Über die mit der statischen Stabilität verträgliche Höhe eines Baumes. HaRuW 5, 297-298.
- Panggabean, H. und K.H. Reichmann, 1977: Reaktion von turmartigen Tragwerken unter zweidimensionaler Windbelastung und Ermittlung der thermischen Belastung durch Sonneneinstrahlung. Beitr. Anwed. Aeroelast. Bauwes., Heft 8.
- Panggabean, H., 1978: Schwingungsverhalten von turmartigen Tragwerken unter aerodynamischer Belastung. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 10.
- Pasquill, F., 1962: Atmospheric diffusion. D. Van Nostrand Company: London.
- Platow, G., 1970: Atmosphärische Turbulenz- und Böigkeitsmaßzahlen im Zusammenhang mit großräumigen Strömungsparametern. Inst. Meteorol. TH Darmstadt, Forschungsvorhaben T 947-I-203.

- Pöytäniemi, A., 1981: Schaftkurvensystem für die Fichte zur Anwendung bei der österreichischen Forstinventur. Diss. Univ. Bodenkultur Wien.
- Pond, S.; G.W. Large; M. Miyake; R.W. Burling, 1979: A Gill twin propeller-vane anemometer for flux measurements during moderate and strong winds. Boundary-Layer Meteorol. 16, 351-364.
- Priehäusser, G., 1943: Über Fichtenwurzelfäule, Kronenform und Standort. Forstw. Cbl. 65, 259-273.
- Raupach, M.R. und A.S. Thom, 1981: Turbulence in and above plant canopies. Ann. Rev. Fluid Mech. 13, 97-129.
- Reichmann, K.H., 1984: Beurteilung der Sicherheit und Zuverlässigkeit turmartiger Bauwerke unter Windeinwirkung. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 19.
- Reifsnyder, W.E., 1955: Wind profiles in a small isolated forest stand. For. Sci. 1, 289-297.
- Roth, R., 1964: Die höhenabhängige Änderung der Windrichtung in der bodennahen Luftschicht. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 9, 75-84.
- Scherer, R.J., 1982: Über die Ermittlung des dynamisch wirkenden Anteils der Windlast mit Hilfe der Zeitreihenanalyse. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 15, 1-34.
- Schmidt-Vogt, H., 1977: Die Fichte, Band 1. Parey-Verlag: Hamburg.
- Schönwiese, C.D., 1983: Varianzspektrum. Promet 1/2, 26-30.
- Schueller, G.I., 1979: Querschwingungen von turmartigen Tragwerken. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 13, 112-116.
- Schueller, G.I. und H. Panggabean, 1975: Ermittlung der Bemessungsgeschwindigkeit unter Zugrundelegung eines Zuverlässigkeitskonzeptes. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 6.

- Schueller, G.I.; H. Panggabean; F.H. Wittmann, 1975: Spectral- and time history approach for prediction of the behaviour of slender structures under wind load - a comparative study. Beitr. Anwend. Aeroelast. Bauwes., Heft 6.
- Schwerdtfeger, F., 1970: Die Waldkrankheiten. Parey-Verlag: Hamburg.
- Scruton, C., 1965: On the wind excited oscillations of stacks, towers and masts. Proc. Wind Effects Build. Struct., Vol. 2, London, 797-832.
- Seginer, I.; P.J. Mulhearn; E.F. Bradley; J.J. Finnigan, 1976: Turbulent flow in a model plant canopy. Boundary-Layer Meteorol. 10, 423-453.
- Shaw, R.H.; R.H. Silversides; G.W. Thurtell, 1974 a: Some observations of turbulence and turbulent transport within and above plant canopies. Boundary-Layer Meteorol. 5, 429-449.
- Shaw, R.H.; G. Den Hartog; K.M. King; G.W. Thurtell, 1974 b: Measurements of mean wind flow and three-dimensional turbulence intensity within a mature corn canopy. Agric. Meteorol. 13, 419-425.
- Shaw, R.H., 1977: Secondary wind speed maxima inside plant canopies. J. Appl. Meteorol. 16, 514-521.
- Silversides, R.H., 1974: On scaling parameters for turbulence spectra within plant canopies. Agric. Meteorol. 13, 203-211.
- Smith, F.B.; D.J. Carson; H.R. Oliver, 1972: Mean wind direction shear through a forest canopy. Boundary-Layer Meteorol. 3, 178-190.
- Stigter, C.J.; J. Goudriaan; F.A. Bottemanne; J. Birnie; J.G. Lengkeek; L. Simba, 1977: Experimental evaluation of a crop climate simulation model for indian corn (Zea mays L.). Agric. Meteorol. 18, 163-186.

- Strouhal, V., 1878: Über eine besondere Art der Tonerregung. Ann. Phys. 5, 216-250.
- Surry, D., 1972: Some effects of intense turbulence on the aerodynamic of a circular cylinder at subcritical Reynolds numbers. J. Fluid Mech. 52, 543-563.
- Tan, H.S. und S.C. Ling, 1961: A study of atmospheric turbulence and canopy flow. TAR-TR 611, Coop. Res. Prog.: Therm Adv. Res., Inc., U.S.D.A. und Cornell Univ.
- Tajchman, S.J., 1972: The radiation and energy balances of coniferous and deciduous forests. J. Appl. Ecol. 9, 359-375.
- Taubenheim, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Verlagsges.: Leipzig.
- Thom, A.S., 1971: Momentum absorption by vegetation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 97, 414-428.
- Thom, A.S., 1975: Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Monteith, J.L. (ed.), Vegetation and the atmosphere, Vol. 1, Academic Press: London.
- Thomson, W.T., 1962: Anwendung statistischer Methoden auf mechanische Schwingungen. VDI-Berichte, Nr. 66, 7-20.
- Tiren, L., 1929: Einige Untersuchungen über die Schaftform. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt, Häfte 24, Nr. 4.
- Truckenbrodt, E., 1968: Strömungsmechanik. Springer-Verlag: Berlin.
- Vickery, B.J. und A.W. Clark, 1972: Lift or across wind response of tapered stacks. Proc. ASCE, Vol. 98, 1-20.
- Wagenknecht, E., 1955: Wurzeluntersuchungen und ihre Bedeutung für standortsgerechten Waldbau. Arch. f. Forstw. 4, 397-406.
- Wagenknecht, E. und G. Belitz, 1959: Die Fichte im nordost-deutschen Flachland. Anbauwürdigkeit und waldbauliche Behandlung. Radebeul und Berlin.

- Walk, O., 1970: Zur Interpretation von Energie-, Ko- und Quadratspektren meteorologischer Parameter. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 20.
- Wangler, F., 1974: Die Sturmgefährdung der Wälder in Süddeutschland - Eine waldbauliche Auswertung der Sturmkatastrophe 1967. Diss. Univ. Freiburg/Br.
- von Wedell, W., 1802: Sturmschäden in Gebirgsforsten, ihre Ursachen und die Mittel ihrer Verhinderung. Halle.
- Wieringa, J., 1967: Evaluation and design of wind vanes. J. Appl. Meteorol. 6, 1114-1122.
- Wieringa, J., 1973: Gust factors over open water and built-up country. Boundary-Layer Meteorol. 3, 424-441.
- Wilson, J.D.; D.P. Ward; G.W. Thurtell; G.E. Kidd, 1982: Statistics of atmospheric turbulence within and above a corn canopy. Boundary-Layer Meteorol. 24, 495-519.
- Windirsch, J., 1936: Der Aufbau des Waldbaumes nach statischer Grundlage. Thar. Forstl. Jb. 87, 533-566.
- WMO (World Meteorological Organization), 1983: Guide for meteorological observations (5. Aufl.). Genf.
- Wölfle, M., 1936: Sturmschäden im Wald. Forstw. Cbl. 58, 605-617.
- Wölfle, M., 1937 a: Sturmschäden im Wald. Forstw. Cbl. 59, 77-92.
- Wölfle, M., 1937 b: Sturmschäden im Wald. Forstw. Cbl. 59, 565-588.
- Wölfle, M., 1942: Windverhältnisse im Walde. Forstw. Cbl. 64, 169-182.
- Wyngaard, J.C., 1981: Cup, propeller, vane, and sonic anemometers in turbulence research. Ann. Fluid Mech. 13, 399-423.
- Ylinen, A., 1952: Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. Silva Fennica Nr. 76.
- Young, R.M. Co., 1978: Instructions for Gill anemometer bi-vane. Traverse City (Michigan).

## Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Normierte Windprofile in Mais- und Sojabohnenbeständen nach verschiedenen Autoren
- Abb. 2: Normierte Windprofile in und über Nadelwäldern nach verschiedenen Autoren
- Abb. 3: Normierte Windprofile vor, in und hinter einem künstlichen Wald (nach Meroney, 1968).
- Abb. 4: Vertikalprofile der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$  in und über einigen landwirtschaftlichen Beständen nach verschiedenen Autoren
- Abb. 5: Vertikalprofile der longitudinalen Turbulenzintensität  $i_{u_1}$  in und über Wäldern nach verschiedenen Autoren
- Abb. 6: Vertikalprofile der longitudinalen ( $=i_{u_1}$ ), lateralen ( $=i_{u_2}$ ) und vertikalen ( $=i_{u_3}$ ) Turbulenzintensitäten in und über einem Maisbestand (nach Shaw et al., 1974 b)
- Abb. 7: Schematische Darstellung zur Bestimmung der Böigkeitskenngrößen  $t_{d,j}$  und  $t_{z,j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  (nach Platow, 1970)
- Abb. 8: Mit dem Quadrat der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  normiertes longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) (nach Kaimal et al., 1972)
- Abb. 9: Vertikales Windspektrum  $f \cdot P_{u_3}(f)$  knapp über der Bestandshöhe eines Fichtenhochwaldes (nach Amtmann, 1982)
- Abb. 10: Ausgeglichene Schaftkurve einer 73-jährigen Fichte (*Picea abies*) (nach Assmann, 1960)
- Abb. 11: Längsverteilung des Elastizitätsmoduls  $E$  bei einer Kiefer (*Pinus sylvestris*) und einer Fichte (*Picea abies*) (nach Ylinen, 1952)
- Abb. 12: Modell einer idealisierten Fichtenkrone (nach Burger, (1939 a))

- Abb. 13: Widerstandsbeiwert  $c_d$  von Sitkafichten (*Picea sitchensis*) in Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  (nach Mayhead, 1973 a; Mayhead et al., 1975)
- Abb. 14: Widerstandsbeiwert  $c_d$  in Abhängigkeit von der horizontalen Windgeschwindigkeit  $u_h$  für die Baumarten Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Drehkiefer (*Pinus contorta* var. *contorta*), Korsische Schwarzkiefer (*Pinus nigra* var. *maitima*) und Sitkafichte (*Picea sitchensis*) (nach Mayhead, 1973 b)
- Abb. 15: Biegemoment  $M_b$  am Stammfuß als Funktion des Neigungswinkels  $\theta$  von Sitkafichten (*Picea sitchensis*) auf Braunerde und Moorgley (nach Fraser und Gardiner, 1967)
- Abb. 16: Schema der Spektralmethode
- Abb. 17: Qualitativer Verlauf des Quadrates der aerodynamischen Übertragungsfunktion  $H_a(f)$  nach verschiedenen Angaben für einen Kreiszylinder bei einer mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{u}=10.0$  m/s
- Abb. 18: Abhängigkeit der Strouhalzahl  $St$  und des Quertriebsbeiwertes  $c_q$  eines quer angeströmten Kreiszylinders von der Reynoldszahl  $Re$  (nach Försching, 1974)
- Abb. 19: Experimentell bestimmte Quertriebsbeiwerte  $c_q$  eines Kreiszylinders als Funktion der Strouhalzahl  $St$  (nach Försching, 1974)
- Abb. 20: Schematisierte Darstellung einer 'Gill Anemometer Bivane' der Firma Young (nach Amtmann, 1985)
- Abb. 21: Vergleich der von einem Propeller angezeigten Windgeschwindigkeiten mit einer idealen Kosinusform für drei verschiedene Windgeschwindigkeiten
- Abb. 22: Schematischer Aufbau eines Beschleunigungsaufnehmers B12/200 der Firma Hottinger Baldwin (nach Hottinger Baldwin, 1976)

- Abb. 23: Schema der Meßwerterfassung zur Untersuchung windinduzierter Baumschwingungen
- Abb. 24: 'aliasing'-Effekt bei Sinusschwingungen (nach Blackman und Tukey, 1958)
- Abb. 25: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 34.0$  m; Meßstelle: Botanikerturm)
- Abb. 26: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 24.0$  m; Meßstelle: Botanikerturm)
- Abb. 27: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst ( $z = 34.0$  m; Meßstelle: Meteorologenturm)
- Abb. 28: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984 am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park ( $z = 3.7$  m)
- Abb. 29: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984 am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park ( $z = 7.5$  m)
- Abb. 30: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M7 am 30.5.1984 am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park ( $z = 15.0$  m)
- Abb. 31: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofdinger Forst ( $z = 3.7$  m)

- Abb. 32: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldinger Forst ( $z = 7.5$  m)
- Abb. 33: Longitudinales, laterales und vertikales Windspektrum ( $= f \cdot P_j(f)$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ ) des Meßlaufes M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen Bestandsrandes im Hofoldinger Forst ( $z = 15.0$  m)
- Abb. 34: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  der Meßserie M4 am 4.1.1984 knapp über der Bestandshöhe ( $z = 34.0$  m) des Fichtenhochwaldes im Ebersberger Forst (Meßstelle: Meteorologenturm)
- Abb. 35: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  der Meßserie M3 am 31.1.1983 am Rand einer Windwurffläche im Forstenrieder Park ( $z = 7.5$  m)
- Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der Schubspannung  $\tau$  der Meßserie M10 am 7.2.1984 in der Nähe eines künstlichen bestandsrandes im Hofoldinger Forst ( $z = 15.0$  m)
- Abb. 37: Autokorrelationsfunktionen der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 im Ebersberger Forst in 3 Höhen
- Abb. 38: Autokorrelationsfunktionen der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M6 am 30.5.1984 im Forstenrieder Park in 3 Höhen
- Abb. 39: Autokorrelationsfunktionen der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M6 am 7.2.1984 im Hofoldinger Forst in 3 Höhen
- Abb. 40: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M3 am 4.1.1984 im Ebersberger Forst in 3 Höhen
- Abb. 41: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M4 am 30.5.1984 im Forstenrieder Park in 3 Höhen
- Abb. 42: Spektren der Schubspannungsfluktuationen  $\tau'$  des Meßlaufes M6 am 7.2.1984 im Hofoldinger Forst in 3 Höhen

- Abb. 43: Zeitverlauf der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen in 20.0 m Höhe über dem Boden beim Baum Nr. 1 im Forstenrieder Park
- Abb. 44: Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Komponente  $y_1$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park ( $z = 20.0$  m)
- Abb. 45: Häufigkeitsverteilung der lateralen Komponente  $y_2$  des horizontalen Baumauslenkungsvektors des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park
- Abb. 46: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 1 im Forstenrieder Park
- Abb. 47: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 7 im Forstenrieder Park
- Abb. 48: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 11 im Hofoldingen Forst
- Abb. 49: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 12 im Hofoldingen Forst
- Abb. 50: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 30 im Ebersberger Forst
- Abb. 51: Spektren der longitudinalen und lateralen Komponente des horizontalen Baumauslenkungsvektors ( $f \cdot P_j(f)$ ,  $j=y_1, y_2$ ) des Baumes Nr. 31 im Ebersberger Forst
- Abb. 52: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 1 (Fichte) im Forstenrieder Park
- Abb. 53: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 7 (Fichte) im Forstenrieder Park

- Abb. 54: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 11 (Kiefer) im Hofoldinger Forst
- Abb. 55: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 12 (Fichte) im Hofoldinger Forst
- Abb. 56: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 30 (Fichte) im Ebersberger Forst
- Abb. 57: Spektren der Beträge der mechanischen Übertragungsfunktionen  $|H_{m,j}(if)|$ ,  $j=y_1, y_2, Y$  für den Baum Nr. 31 (Fichte) im Ebersberger Forst

## Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Eigenfrequenzen  $f_n$  (in Hz) und mit der Länge  $l_B$  (in m) multiplizierte Eigenwerte  $\alpha_n$  (in 1/m) eines einseitig eingespannten Balkens (nach Panggabean, 1978)
- Tab. 2: Bestandscharakteristika und Windverhältnisse für die in Abb. 2 dargestellten vertikalen Windprofile
- Tab. 3: Mittlere Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ , mittlere Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$  (in s) sowie mittlere Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$  (in s),  $j=u_1, u_2, u_3$  knapp über der Bestandshöhe ( $z/H=1.03$ ) eines Fichtenwaldes bei verschiedenen Meßläufen (nach Amtmann, 1981; Mayer und Amtmann, 1983)
- Tab. 4: Mittelwerte der Rohdichte  $\rho_r$ , darrtrocken (= dt) und lufttrocken (= lt), der Biegefestigkeit  $\sigma_B$  und des Elastizitätsmoduls  $E$  parallel (= pa) und quer (= qu) zur Faserrichtung von verschiedenen Holzarten (nach Göhre, 1961; Knigge und Schulz, 1966)
- Tab. 5: Kennmaße des Modells einer Fichten- und einer Kiefernkrone (nach Assmann, 1961)
- Tab. 6: Mittlere Kenngrößen einer 'Gill Anemometer Bivane' der Firma Young (nach Young Co., 1978)
- Tab. 7: Verzeichnis der ausgewählten Meßläufe aus den Meßkampagnen im Ebersberger Forst (E), Forstenrieder Park (F) und Hofoldingen Forst (H)
- Tab. 8: Windverhältnisse an der Station München-Riem des Deutschen Wetterdienstes (DWD) an den Meßtagen
- Tab. 9: Betrag des mittleren Windvektors  $\left| \overline{\vec{u}} \right|$  (in m/s) und mittlerer Azimutwinkel  $\overline{\alpha}$  (in Grad) pro Meßlauf für die ausgewählten Meßläufe
- Tab. 10: Mittelwerte der Varianz  $\sigma^2$  (in  $m^2/s^2$ ), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der Windvektorkomponenten im strömungsorientierten Koordinatensystem

- Tab. 11: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  sowie die mittleren Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Forstenrieder Park am 31.1.1983 und 30.5.1984
- Tab. 12: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  sowie die mittleren Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Ebersberger Forst am 4.1.1984
- Tab. 13: Turbulenzintensitäten  $i_j$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$ , ihre Quotienten  $i_{u_2}/i_{u_1}$  und  $i_{u_3}/i_{u_1}$  sowie die mittleren Böigkeitsfaktoren  $\overline{GT_j}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für die ausgewählten Meßläufe im Hofoldinger Forst am 7./8.2.1984
- Tab. 14: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $\text{Max}$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) der Spektrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei den ausgewählten Meßserien im Ebersberger Forst
- Tab. 15: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $\text{Max}$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) der Spektrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei den ausgewählten Meßserien im Forstenrieder Park
- Tab. 16: Frequenzen  $f$  (in Hz) und Beträge  $\text{Max}$  (in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) der Spektrenmaxima der longitudinalen ( $= u_1$ ), lateralen ( $= u_2$ ) und vertikalen ( $= u_3$ ) Windvektorkomponenten in 3 Höhen bei den ausgewählten Meßserien im Hofoldinger Forst
- Tab. 17: Mittelwert  $\text{Mit}$  (in  $\text{N}/\text{m}^2$ ), Varianz  $\sigma^2$  (in  $\text{N}^2/\text{m}^4$ ), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der Schubspannungen in 3 Höhen bei allen ausgewählten Meßserien
- Tab. 18: Charakteristische Abmessungen der Versuchsbäume auf den Meßflächen im Forstenrieder Park (F), Hofoldinger Forst (H) und Ebersberger Forst (E)

- Tab. 19: Baumvolumina  $v_1, v_2, v_3$  und  $\hat{v}$  ( $\hat{v} = \frac{1}{3} (v_1 + v_2 + v_3)$ ), Baummasse  $m$  und Projektionsfläche  $A$  der Baumkrone senkrecht zur horizontalen Anströmungsrichtung der Versuchsbäume
- Tab. 20: Durchmesser des Bezugszylinders  $d_{Wal}$ , kritische Kraft  $F_{kr}$  und nach verschiedenen Methoden bestimmte kritische horizontale Windgeschwindigkeiten  $u_h^{St}$  und  $u_h^{Fr}$  sowie theoretisch bestimmte Frequenzen der Grundschwingung  $f_1^{DGL}$  und  $f_1^{MAY}$
- Tab. 21: Mittelwert  $\bar{y}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 1 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Forstenrieder Park
- Tab. 22: Mittelwert  $\bar{y}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 20.0 m Höhe beim Baum Nr. 7 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Forstenrieder Park
- Tab. 23: Mittelwert  $\bar{y}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 11 (Kiefer) während ausgewählter Meßserien im Hofoldinger Forst
- Tab. 24: Mittelwert  $\bar{y}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe  $S$  und Kurtosis  $K$  der longitudinalen ( $= y_1$ ) und lateralen ( $= y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 15.0 m Höhe beim Baum Nr. 12 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Hofoldinger Forst

- Tab. 25: Mittelwert  $\bar{M}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus verschiedenen Höhen beim Baum Nr. 30 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Ebersberger Forst
- Tab. 26: Mittelwert  $\bar{M}$  (in  $10^{-2}$  m), Varianz  $\sigma^2$  (in  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>), Schiefe S und Kurtosis K der longitudinalen (=  $y_1$ ) und lateralen (=  $y_2$ ) Komponente des Vektors der horizontalen Baumauslenkungen aus 25.0 m Höhe beim Baum Nr. 31 (Fichte) während ausgewählter Meßserien im Ebersberger Forst
- Tab. 27: Aus den Auslenkungsspektren entnommene und berechnete Eigenfrequenzen der 1. Oberschwingung
- Tab. 28: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 1 im Forstenrieder Park
- Tab. 29: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 7 im Forstenrieder Park
- Tab. 30: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 11 im Hofoldinger Forst
- Tab. 31: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 12 im Hofoldinger Forst
- Tab. 32: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 30 im Ebersberger Forst

Tab. 33: Frequenzen  $f_{\max}$  der Amplitudenmaxima der longitudinalen und lateralen Baumauslenkungsspektren, sowie daraus abgeleitete logarithmische Dekremente  $\delta T$  für den Baum Nr. 31 im Ebersberger Forst

## Verzeichnis der verwendeten Symbole

|                  |                                                                              |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $A$              | Projektionsfläche eines Körpers senkrecht zur Anströmungsrichtung            |
| $A_1$            | empirische Konstante des Windprofils im Bestand in Gl. (37)                  |
| $A_2$            | empirische Konstante des Windprofils im Bestand in Gl. (39)                  |
| $A_{u_1}$        | universelle Konstante in Gl. (44)                                            |
| $c_d$            | Widerstandsbeiwert eines Körpers                                             |
| $c_m$            | Massen- oder Trägheitsbeiwert eines Körpers                                  |
| $c_n$            | Konstanten in Gl. (26)                                                       |
| $c_q$            | Quertriebsbeiwert eines Körpers                                              |
| $c_q^{\max}$     | maximaler Quertriebsbeiwert eines Körpers                                    |
| $C$              | Konstante in Gl. (26)                                                        |
| $C_{1n}, C_{2n}$ | Konstanten in Gl. (24)                                                       |
| $C_{3n}, C_{4n}$ |                                                                              |
| $C_d$            | Widerstandsbeiwert der Bestandsoberfläche                                    |
| $C_F$            | Konstante im Quertriebsspektrum von Fung (1960)                              |
| $C_V$            | Streuungsparameter im Quertriebsbeiwertspektrum von Vickery und Clark (1972) |
| $d$              | charakteristische Körperdimension (z.B. Zylinderdurchmesser)                 |
| $d_0$            | Nullpunktverschiebung                                                        |
| $d_{1.3}$        | Brusthöhendurchmesser                                                        |
| $d_{\text{Wal}}$ | Durchmesser des Ersatzzylinders für einen Baumstamm gleichen Volumens        |
| $dd$             | Windrichtung                                                                 |
| $D$              | Dämpfungskonstante eines schwingungsfähigen Systems                          |
| $Dd$             | 'delay distance' der Windfahne                                               |

|                                   |                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Df                                | Freiheitsgrade der Spektren                                                                                                                                 |
| D(k)                              | Filterfunktion zur Spektrenberechnung:<br>$D(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \frac{\pi \cdot k}{M}) & k < M \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ |
| e                                 | Dissipationsenergie                                                                                                                                         |
| E                                 | Elastizitätsmodul des Holzes                                                                                                                                |
| f                                 | Frequenz                                                                                                                                                    |
| f <sub>0</sub>                    | Frequenz der gedämpften Grundschiwingung                                                                                                                    |
| f <sub>1.3</sub>                  | Brusthöhenformzahl                                                                                                                                          |
| f <sub>k</sub>                    | Kronenformzahl                                                                                                                                              |
| f <sub>n</sub>                    | Eigenfrequenzen der DGL (21)                                                                                                                                |
| f <sub>r</sub>                    | Frequenz der ungedämpften Grundschiwingung                                                                                                                  |
| f <sub>un</sub> , f <sub>ob</sub> | Frequenzen unter- und oberhalb von f <sub>res</sub> in Gl. (34)                                                                                             |
| f <sub>res</sub>                  | Resonanzfrequenz                                                                                                                                            |
| f <sub>wir</sub>                  | Wirbelablösefrequenz am umströmten Körper                                                                                                                   |
| f <sub>N</sub>                    | Nyquist-Frequenz                                                                                                                                            |
| f <sub>max</sub>                  | maximale Frequenz                                                                                                                                           |
| f' <sub>k</sub>                   | Formzahl zur Berechnung der Kronenfläche senkrecht zur Anströmungsrichtung                                                                                  |
| f <sub>1</sub> <sup>DGL</sup>     | Grundschiwingungsfrequenz nach Gl. (23)                                                                                                                     |
| f <sub>1</sub> <sup>MAY</sup>     | Grundschiwingungsfrequenz nach Gl. (105) bzw. Gl. (106)                                                                                                     |
| ff                                | Windgeschwindigkeit                                                                                                                                         |
| F                                 | Betrag einer Kraft                                                                                                                                          |
| F <sub>kr</sub>                   | kritische Kraft in Gl. (58)                                                                                                                                 |
| F <sub>max</sub>                  | maximaler Betrag einer Kraft                                                                                                                                |
| g                                 | Erdbeschleunigung                                                                                                                                           |
| GT <sub>j</sub>                   | Böigkeitsfaktoren der Windvektorkomponenten j=u <sub>1</sub> , u <sub>2</sub> , u <sub>3</sub>                                                              |
| h                                 | Baumhöhe                                                                                                                                                    |

|                    |                                                                      |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $h_a$              | Kronenansatzhöhe eines Baumes                                        |
| hh                 | Anzahl der Stützstellen der Spektren                                 |
| H                  | Bestandshöhe                                                         |
| $H_a$              | mittlere Kronenansatzhöhe in einem Bestand                           |
| $H_a(f)$           | aerodynamische Übertragungsfunktion                                  |
| $H_f(f)$           | Filterfunktion zur Spektrenberechnung                                |
| $H_m(if)$          | mechanische Übertragungsfunktion                                     |
| $i_j$              | Turbulenzintensitäten der Windvektorkomponenten<br>$j=u_1, u_2, u_3$ |
| I                  | Kroneninhalt einer Fichte ( <i>Picea abies</i> )                     |
| J                  | Flächenträgheitsmoment                                               |
| k                  | Ordnungszahl der Verschiebungen                                      |
| $k_1, k_2, k_3$    | Wellenzahlen in den drei Koordinatenrichtungen                       |
| $k_S$              | Systemsteifigkeit                                                    |
| K                  | Kurtosis                                                             |
| $\dot{K}o_{xy}(f)$ | Kospektrum von x und y                                               |
| Koh(f)             | Kohärenzspektrum zweier Größen                                       |
| l                  | Kronenlänge eines Baumes                                             |
| $l_b$              | größte Kronenbreite eines Baumes                                     |
| $l_o$              | Länge der Lichtkrone eines Baumes                                    |
| $l_u$              | Länge der Schattenkrone eines Baumes                                 |
| $l_B$              | Länge eines einseitig eingespannten Balkens                          |
| $l_M$              | Mischungsweglänge ( $u'_1 = l_M \cdot \overline{du_1/dx_3}$ )        |
| LAD(z)             | höhenabhängige Oberfläche aller Blätter pro Volumeneinheit           |
| LAV                | senkrecht zur Strömung stehende Blattfläche pro Volumeneinheit       |

|                    |                                                                                              |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m$                | Masse, Baummasse                                                                             |
| $m_a$              | Masse des Astreisigs                                                                         |
| $M$                | maximale Anzahl der Verschiebungen                                                           |
| $M_b$              | Biegemoment                                                                                  |
| $M_{b_{\max}}$     | maximales Biegemoment                                                                        |
| $M_1(0) = \bar{x}$ | Moment 1. Ordnung = zeitlicher Mittelwert von $x$                                            |
| $M_k(\bar{x})$     | $k$ -tes Zentralmoment von $x$                                                               |
| $N$                | Werteanzahl                                                                                  |
| $P_x(f)$           | Varianzspektrum von $x$                                                                      |
| $P_{xy}(f)$        | Kreuzspektrum von $x$ und $y$                                                                |
| $P_{Cq}^*(St)$     | normiertes Quertriebsbeiwertspektrum                                                         |
| $q$                | horizontale Querschnittsfläche eines Körpers                                                 |
| $Q(t)$             | instationäre Quertriebskraft                                                                 |
| $Q_{u_{xy}}(f)$    | Quadraturspektrum von $x$ und $y$                                                            |
| $Re$               | Reynoldszahl                                                                                 |
| $R_{xx}(k)$        | Autokorrelationsfunktion von $x$                                                             |
| $R_{xy}(k)$        | Kreuzkorrelationsfunktion von $x$ und $y$                                                    |
| $S$                | Schiefte                                                                                     |
| $St$               | Strouhalzahl                                                                                 |
| $Sw$               | Schwellenwert                                                                                |
| $t$                | Zeit                                                                                         |
| $t'$               | beliebiges Zeitintervall mit $\Delta t < t' < T$                                             |
| $t_m$              | Intervall der übergreifenden Mittelung der Datensätze                                        |
| $t_{d,j}$          | Böendauer bei den Windvektorkomponenten $j=u_1, u_2, u_3$                                    |
| $t_{z,j}$          | Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen bei den Windvektorkomponenten $j=u_1, u_2, u_3$ |
| $T$                | Dauer einer Meßserie                                                                         |
| $T_1$              | Dauer der Grundschiwingung                                                                   |

|                         |                                                                                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{ik}$                | Schubspannungstensor                                                                               |
| $u$                     | Windgeschwindigkeit                                                                                |
| $u_0$                   | Strömungsgeschwindigkeit                                                                           |
| $u_1, u_2, u_3$         | Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors                                                        |
| $u_h$                   | horizontale Windgeschwindigkeit                                                                    |
| $\vec{u}$               | Windgeschwindigkeitsvektor                                                                         |
| $\tilde{u}$             | relative Windgeschwindigkeit bezogen auf einen bewegten Körper                                     |
| $u_*$                   | Schubspannungsgeschwindigkeit                                                                      |
| $u_{kr}$                | kritische Windgeschwindigkeit                                                                      |
| $u_h^{Fr}$              | horizontale Windgeschwindigkeit nach Gl. (56)                                                      |
| $u_h^{St}$              | horizontale Windgeschwindigkeit nach Gl. (63)                                                      |
| $u_i^{max}$             | Maxima der Windvektorkomponenten $u_i$ , $i=1,2,3$ in einem beliebigen Zeitintervall $t'$          |
| $v$                     | Baumvolumen                                                                                        |
| $x=\bar{x}+x'$          | beliebige Größe $x$ , zerlegt in ein zeitliches Mittel $\bar{x}$ und einen turbulenten Anteil $x'$ |
| $x_1, x_2, x_3$         | longitudinale, laterale und vertikale Richtung der Achsen im                                       |
| $y$                     | beliebige Größe                                                                                    |
| $y_1, y_2$              | longitudinale und laterale Komponente des Baumauslenkungsvektors                                   |
| $\vec{y}$               | horizontaler Baumauslenkungsvektor                                                                 |
| $Y$                     | Auslenkung                                                                                         |
| $\dot{Y}=\frac{dY}{dt}$ | Schwingungsgeschwindigkeit eines Körpers                                                           |
| $Y_0$                   | Auslenkung zur Zeit $t=0$                                                                          |
| $Y_n(z)$                | Eigenformen der Durchbiegung                                                                       |
| $z$                     | Höhe, Vertikalkoordinate                                                                           |

|                        |                                                               |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $z_o$                  | Rauhigkeitsparameter                                          |
| $\alpha$               | Azimut                                                        |
| $\alpha_n$             | Eigenwerte der DGL (21)                                       |
| $\Gamma$               | Anströmungswinkel des Propellers bezogen auf seine Achse      |
| $\delta$               | Abklingkonstante                                              |
| $\delta_e$             | effektive Abklingkonstante                                    |
| $\delta_s$             | strukturspezifische Abklingkonstante                          |
| $\delta_{ae}$          | aerodynamische Abklingkonstante                               |
| $\delta T$             | logarithmisches Dekrement                                     |
| $\Delta$               | Dämpfungsverhältnis                                           |
| $\Delta f (hh)$        | Frequenzintervall                                             |
| $\Delta t$             | Zeitdifferenz zweier aufeinanderfolgender Meßwerte            |
| $\Delta z$             | vertikale Längeneinheit                                       |
| $\Delta \alpha$        | Windrichtungsänderung                                         |
| $\varepsilon$          | Elevation                                                     |
| $\zeta$                | Dämpfungsverhältnis einer Windfahne                           |
| $\theta_{\text{math}}$ | mathematischer Drehwinkel des Koordinatensystems              |
| $\theta_{\text{met}}$  | meteorologischer Drehwinkel des Koordinatensystems            |
| $\theta$               | Neigungs- bzw. Auslenkungswinkel eines Baumstammes            |
| $\theta_{\text{max}}$  | Maximum von $\theta$                                          |
| $\theta_{xy}(f)$       | Phasenspektrum von x und y                                    |
| $\kappa$               | von Kármánsche Konstante                                      |
| $\lambda_d$            | Wellenlänge der gedämpften Grundschiwingung einer Windfahne   |
| $\lambda_n$            | Wellenlänge der ungedämpften Grundschiwingung einer Windfahne |
| $\mu$                  | dynamische Zähigkeit                                          |
| $\nu$                  | kinematische Zähigkeit                                        |

|              |                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\rho_1$     | Dichte                                                               |
| $\rho_r$     | Dichte der Luft                                                      |
| $\rho$       | Dichte des Holzes                                                    |
| $\sigma_B$   | Biegefestigkeit                                                      |
| $\sigma_x$   | Standardabweichung von x                                             |
| $\sigma_x^2$ | Varianz von x                                                        |
| $\tau$       | Schubspannung ( $\tau = T_{13}$ )                                    |
| $\varphi$    | Phasenverschiebung                                                   |
| $\Omega$     | Auslenkungswinkel des Beschleunigungsaufnehmers aus der Horizontalen |

### A n h a n g

Tabellen der mittleren Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  und den mittleren Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  für alle Meßläufe

Tab. A1: Mittlere Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  (in s) bei verschiedenen Schwellenwerten  $Sw$  für die ausgewählten Meßserien vom Forstenrieder Park am 31.1.1983 und 30.5.1984

| 3.7 m     |                |     | 7.5 m     |     |     | 15.0 m    |     |     |           |     |     |           |     |     |     |     |
|-----------|----------------|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 30.5.1984 |                |     | 31.1.1983 |     |     | 30.5.1984 |     |     | 31.1.1983 |     |     | 30.5.1984 |     |     |     |     |
|           | M2             | M4  | M7        | M2  | M3  | M7        | M2  | M4  | M7        | M2  | M3  | M7        | M2  | M4  | M7  |     |
| Sw = 0.05 | u <sub>1</sub> | 9.1 | xxx       | 8.1 | 4.7 | 5.0       | 5.0 | 7.0 | xxx       | 6.8 | 4.6 | 5.5       | 4.3 | 7.0 | 8.7 | 6.1 |
|           | u <sub>2</sub> | xxx | xxx       | xxx | 4.9 | 5.4       | 4.9 | 9.8 | xxx       | 9.8 | 4.2 | 3.8       | 4.4 | 9.3 | 8.9 | 8.5 |
|           | u <sub>3</sub> | 4.3 | 4.0       | 4.2 | 3.7 | 3.7       | 3.0 | 7.0 | xxx       | 5.9 | 3.4 | 3.9       | 3.5 | 5.2 | 5.5 | 5.0 |
| Sw = 0.10 | u <sub>1</sub> | 6.1 | 9.2       | 6.3 | 2.4 | 2.5       | 2.5 | 4.6 | 8.4       | 5.1 | 2.6 | 3.0       | 2.2 | 5.5 | 6.6 | 4.6 |
|           | u <sub>2</sub> | 9.1 | xxx       | xxx | 2.5 | 2.7       | 2.6 | 6.8 | 7.5       | 7.3 | 2.4 | 2.1       | 2.7 | 5.7 | 5.9 | 6.1 |
|           | u <sub>3</sub> | 2.8 | 2.7       | 2.7 | 1.8 | 1.9       | 1.5 | 4.6 | 9.8       | 2.9 | 1.8 | 2.0       | 2.0 | 3.5 | 3.9 | 3.1 |
| Sw = 0.20 | u <sub>1</sub> | 4.6 | 7.4       | 5.0 | 1.0 | 1.2       | 1.0 | 4.0 | 6.5       | 4.1 | 1.8 | 1.7       | 1.4 | 4.5 | 5.6 | 3.7 |
|           | u <sub>2</sub> | 6.5 | 7.8       | 8.2 | 1.2 | 1.3       | 1.3 | 5.2 | 5.1       | 6.0 | 1.4 | 1.3       | 1.7 | 4.5 | 4.1 | 4.7 |
|           | u <sub>3</sub> | 2.0 | 1.7       | 1.8 | 0.8 | 0.8       | 0.8 | 2.6 | 6.4       | 1.4 | 1.0 | 1.0       | 1.2 | 2.5 | 2.9 | 2.7 |
| Sw = 0.30 | u <sub>1</sub> | 4.4 | 7.1       | 4.4 | 0.6 | 0.8       | 0.6 | 3.3 | 5.4       | 3.9 | 1.4 | 1.3       | 1.1 | 4.0 | 5.0 | 3.2 |
|           | u <sub>2</sub> | 6.1 | 7.1       | 6.5 | 0.8 | 0.8       | 1.0 | 4.4 | 4.3       | 5.5 | 1.0 | 1.0       | 1.3 | 3.7 | 3.9 | 3.3 |
|           | u <sub>3</sub> | 1.6 | 1.2       | 1.3 | 0.5 | 0.5       | 0.5 | 1.6 | 3.7       | 1.3 | 0.7 | 0.7       | 0.9 | 1.9 | 2.3 | 2.1 |
| Sw = 0.40 | u <sub>1</sub> | 3.7 | 5.8       | 4.0 | 0.5 | 0.6       | 0.4 | 2.9 | 4.8       | 4.6 | 1.2 | 1.2       | 0.9 | 3.3 | 4.1 | 2.7 |
|           | u <sub>2</sub> | 5.2 | 5.2       | 5.2 | 0.6 | 0.6       | 0.8 | 3.9 | 3.7       | 4.4 | 0.9 | 0.8       | 1.1 | 3.0 | 3.2 | 3.0 |
|           | u <sub>3</sub> | 1.2 | 1.0       | 1.1 | 0.4 | 0.4       | 0.4 | 1.2 | 2.9       | 1.5 | 0.5 | 0.5       | 0.8 | 1.9 | 1.8 | 1.7 |
| Sw = 0.50 | u <sub>1</sub> | 3.6 | 5.0       | 3.5 | 0.4 | 0.5       | 0.4 | 2.7 | 4.5       | 3.7 | 0.9 | 1.1       | 0.8 | 2.8 | 3.6 | 2.5 |
|           | u <sub>2</sub> | 5.2 | 5.3       | 4.9 | 0.4 | 0.5       | 0.6 | 3.4 | 3.3       | 3.2 | 0.7 | 0.6       | 0.9 | 2.5 | 2.5 | 2.9 |
|           | u <sub>3</sub> | 1.0 | 0.9       | 0.9 | 0.3 | 0.3       | 0.3 | 1.5 | 4.3       | 1.2 | 0.4 | 0.4       | 0.6 | 1.6 | 1.4 | 1.6 |

Tab. A2: Mittlere Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  (in s) bei verschiedenen Schwellenwerten Sw für die ausgewählten Meßserien vom Forstentrierder Park am 31.1.1983 und 30.5.1984

|           |                | 3.7 m     |     |     | 7.5 m     |     |     | 15.0 m    |     |     |
|-----------|----------------|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
|           |                | 30.5.1984 |     |     | 31.1.1983 |     |     | 30.5.1984 |     |     |
|           |                | M2        | M4  | M7  | M2        | M3  | M7  | M2        | M3  | M7  |
| Sw = 0.05 | u <sub>1</sub> | 0.3       | 0.2 | 0.3 | 0.1       | 0.1 | 0.1 | 0.1       | 0.1 | 0.1 |
|           | u <sub>2</sub> | 0.4       | 0.4 | 0.3 | 0.1       | 0.1 | 0.1 | 0.2       | 0.1 | 0.2 |
|           | u <sub>3</sub> | 0.3       | 0.5 | 0.4 | 0.1       | 0.1 | 0.1 | 1.3       | 0.1 | 1.2 |
| Sw = 0.10 | u <sub>1</sub> | 0.7       | 0.6 | 0.7 | 0.1       | 0.1 | 0.1 | 0.7       | 0.8 | 0.9 |
|           | u <sub>2</sub> | 0.7       | 0.9 | 0.9 | 0.1       | 0.1 | 0.2 | 0.6       | 0.7 | 0.9 |
|           | u <sub>3</sub> | 0.8       | 1.0 | 0.9 | 0.1       | 0.2 | 0.2 | 2.6       | 4.0 | 3.2 |
| Sw = 0.20 | u <sub>1</sub> | 1.6       | 1.5 | 1.8 | 0.2       | 0.2 | 0.2 | 2.0       | 1.6 | 2.4 |
|           | u <sub>2</sub> | 1.5       | 1.7 | 2.1 | 0.3       | 0.3 | 0.4 | 1.6       | 1.5 | 2.0 |
|           | u <sub>3</sub> | 2.2       | 2.4 | 2.4 | 0.3       | 0.3 | 0.5 | 7.0       | 6.3 | xxx |
| Sw = 0.30 | u <sub>1</sub> | 2.9       | 2.5 | 2.7 | 0.5       | 0.4 | 0.4 | 3.4       | 2.7 | 4.7 |
|           | u <sub>2</sub> | 2.9       | 2.7 | 3.0 | 0.5       | 0.5 | 0.8 | 2.7       | 2.4 | 3.6 |
|           | u <sub>3</sub> | 4.4       | 4.2 | 4.5 | 0.6       | 0.6 | 1.0 | xxx       | 8.4 | xxx |
| Sw = 0.40 | u <sub>1</sub> | 3.9       | 3.1 | 4.2 | 0.9       | 0.7 | 0.7 | 5.4       | 4.2 | 8.3 |
|           | u <sub>2</sub> | 4.1       | 3.1 | 4.0 | 0.8       | 0.8 | 1.2 | 4.2       | 3.5 | 4.9 |
|           | u <sub>3</sub> | 7.4       | 8.0 | 7.4 | 1.0       | 1.0 | 1.8 | xxx       | xxx | xxx |
| Sw = 0.50 | u <sub>1</sub> | 5.9       | 4.1 | 5.5 | 1.4       | 1.3 | 1.3 | 8.8       | 6.3 | 9.6 |
|           | u <sub>2</sub> | 6.1       | 4.8 | 5.3 | 1.2       | 1.1 | 1.7 | 6.0       | 5.3 | 6.1 |
|           | u <sub>3</sub> | xxx       | xxx | xxx | 1.7       | 1.5 | 2.7 | xxx       | xxx | xxx |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |
|           |                |           |     |     |           |     |     |           |     |     |



Tab. A4: Mittlere Zeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Böen  $\overline{t_{z,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  (in s) bei verschiedenen Schwellenwerten Sw für die ausgewählten Meßserien vom Ebersberger Forst am 4.1.1984

|           |                |  | 34.0 m   |     |     |     |     | 24.0 m |     |     |     |     | 34.0 m |     |     |     |     |
|-----------|----------------|--|----------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|
|           |                |  | 4.1.1984 |     |     |     |     |        |     |     |     |     |        |     |     |     |     |
|           |                |  | M1       | M3  | M4  | M5  | M8  | M1     | M3  | M4  | M5  | M8  | M1     | M3  | M4  | M5  | M8  |
| Sw = 0.05 | u <sub>1</sub> |  | 0.1      | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.2      | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1    | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.1      | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1    | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 |
| Sw = 0.10 | u <sub>1</sub> |  | 0.3      | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.1    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1    | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.4      | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.1    | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3    | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.4 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.3      | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.2    | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3    | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| Sw = 0.20 | u <sub>1</sub> |  | 0.6      | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.2    | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2    | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.5 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.7      | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 0.2    | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.7    | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 1.0 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.6      | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.4    | 0.8 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.9    | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 1.5 |
| Sw = 0.30 | u <sub>1</sub> |  | 1.1      | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 0.3    | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 1.0    | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 1.2 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 1.2      | 1.7 | 1.4 | 1.2 | 1.5 | 0.4    | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 1.3    | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.7 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 1.1      | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 0.6    | 1.3 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 1.6    | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 2.5 |
| Sw = 0.40 | u <sub>1</sub> |  | 1.8      | 1.6 | 1.8 | 1.7 | 2.1 | 0.5    | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1.7    | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.9 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 1.8      | 2.5 | 1.9 | 1.9 | 2.4 | 0.6    | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.9 | 1.9    | 2.1 | 2.2 | 1.9 | 2.6 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 1.9      | 2.8 | 2.6 | 2.5 | 3.4 | 0.9    | 1.6 | 0.8 | 0.8 | 1.1 | 2.5    | 2.9 | 3.0 | 2.7 | 4.1 |
| Sw = 0.50 | u <sub>1</sub> |  | 2.5      | 2.2 | 2.4 | 2.5 | 3.3 | 0.7    | 0.8 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 2.3    | 2.2 | 2.0 | 2.1 | 2.5 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 2.4      | 3.4 | 2.8 | 2.8 | 3.5 | 0.8    | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 1.0 | 2.6    | 3.2 | 3.2 | 2.9 | 4.0 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 3.0      | 4.6 | 3.9 | 3.9 | 6.2 | 1.1    | 1.8 | 0.9 | 0.9 | 1.4 | 4.1    | 4.8 | 5.0 | 4.2 | 6.9 |

Tab. A5: Mittlere Böendauern  $\overline{t_{d,j}}$ ,  $j=u_1, u_2, u_3$  (in s) bei verschiedenen Schwellenwerten Sw für die ausgewählten Meßserien vom Hofdinger Forst am 7./8.2.1984

|           |                |  | 3.7 m    |     |     |     | 7.5 m    |     |     |     | 15.0 m   |     |     |     |     |     |     |
|-----------|----------------|--|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |                |  | 7.2.1984 |     |     |     | 7.2.1984 |     |     |     | 7.2.1984 |     |     |     |     |     |     |
|           |                |  | M6       | M9  | M10 | M2  | M4       | M6  | M9  | M10 | M2       | M4  | M6  | M9  | M10 | M2  | M4  |
| Sw = 0.05 | u <sub>1</sub> |  | 9.1      | 9.4 | 7.4 | 7.4 | xxx      | 7.6 | 8.4 | 5.9 | 7.2      | 8.8 | 6.7 | 5.2 | 5.4 | 6.7 | 6.6 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 1.9      | 3.1 | 4.0 | 2.8 | 2.8      | 2.8 | 2.5 | 3.7 | 3.3      | 3.1 | 8.1 | 4.8 | 8.3 | 7.8 | 4.8 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.6      | 2.1 | 3.9 | 1.1 | 1.0      | 1.3 | 1.2 | 1.8 | 1.9      | 1.0 | 2.1 | 0.9 | 3.5 | 1.2 | 1.2 |
| Sw = 0.10 | u <sub>1</sub> |  | 4.6      | 5.7 | 4.0 | 5.0 | 4.1      | 4.0 | 3.3 | 3.6 | 4.1      | 4.4 | 4.0 | 2.6 | 3.0 | 3.2 | 2.8 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 1.2      | 1.7 | 2.7 | 1.7 | 1.5      | 1.7 | 1.7 | 2.3 | 2.1      | 1.9 | 4.0 | 3.3 | 5.2 | 4.5 | 3.3 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.4      | 1.1 | 2.2 | 0.6 | 0.6      | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.2      | 0.6 | 1.9 | 0.7 | 1.7 | 1.0 | 1.1 |
| Sw = 0.20 | u <sub>1</sub> |  | 2.1      | 2.3 | 1.8 | 2.0 | 2.2      | 1.8 | 1.5 | 1.6 | 1.7      | 2.0 | 2.4 | 1.2 | 1.7 | 1.8 | 1.6 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.7      | 1.0 | 1.5 | 1.0 | 0.8      | 1.1 | 1.0 | 1.5 | 1.4      | 1.2 | 2.2 | 2.3 | 3.2 | 2.4 | 1.7 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.3      | 0.6 | 1.4 | 0.4 | 0.4      | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.7      | 0.4 | 1.5 | 0.8 | 0.8 | 1.4 | 1.2 |
| Sw = 0.30 | u <sub>1</sub> |  | 1.4      | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.4      | 1.1 | 0.9 | 1.0 | 1.1      | 1.1 | 1.9 | 0.8 | 1.3 | 1.3 | 0.8 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.5      | 0.7 | 1.1 | 0.7 | 0.6      | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 1.1      | 0.9 | 1.6 | 1.4 | 2.3 | 1.7 | 1.2 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.4      | 0.5 | 1.0 | 0.4 | 0.3      | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.6      | 0.3 | 1.2 | 0.8 | 0.7 | 1.2 | 1.0 |
| Sw = 0.40 | u <sub>1</sub> |  | 0.9      | 1.0 | 0.7 | 0.9 | 0.8      | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.8      | 0.8 | 1.5 | 0.7 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.4      | 0.5 | 0.8 | 0.5 | 0.5      | 0.7 | 0.6 | 0.9 | 0.9      | 0.7 | 1.2 | 1.1 | 1.5 | 1.6 | 1.1 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.4      | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.3      | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.5      | 0.3 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 1.1 | 0.9 |
| Sw = 0.50 | u <sub>1</sub> |  | 0.7      | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.6      | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6      | 0.5 | 1.3 | 0.6 | 1.1 | 0.9 | 0.9 |
|           | u <sub>2</sub> |  | 0.3      | 0.5 | 0.6 | 0.4 | 0.4      | 0.6 | 0.5 | 0.8 | 0.8      | 0.6 | 1.1 | 0.9 | 1.1 | 1.7 | 1.0 |
|           | u <sub>3</sub> |  | 0.4      | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.3      | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5      | 0.3 | 1.0 | 1.3 | 0.7 | 1.0 | 0.7 |





Folgende Hefte der Reihe "Forstliche Forschungsberichte München" sind bisher erschienen:

---

|        |      |                                     |                                                                                                                                         |
|--------|------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nr. 46 | 1980 | KOLLOQUIUM                          | Öffentlichkeitsarbeit als Problem von Forst- und Holzwirtschaft<br>DM 11,50                                                             |
| Nr. 47 | 1981 | W.LAATSCH<br>B. ZENKE<br>J. Dankerl | Verfahren zur Reichweiten- und Stoßdruckberechnung von Fließlawinen<br>DM 15,--                                                         |
| Nr. 48 | 1981 | M. HORNDASCH<br>F. FRANZ            | Die Standortserkundung in den Staatswäldungen der Oberforstdirektion Augsburg<br>DM 13,--                                               |
| Nr. 49 | 1981 | KOLLOQUIUM                          | Die Statistik über Forst- und Holzwirtschaft Bestandsaufnahme und Folgerungen<br>DM 11,50                                               |
| Nr. 50 | 1982 | A. KARAMERIS                        | Analyse und Prognose der Erholungsnachfrage in Wäldern als forstlicher Beitrag zur Raumplanung<br>DM 16,50                              |
| Nr. 51 | 1982 | H. RÖHLE                            | Struktur und Wachstum von Stieleichen-Mischbeständen auf grundwasserbeeinflußten Standorten in den Auewäldungen Südbayerns<br>DM 15,--  |
| Nr. 52 | 1982 | KOLLOQUIUM                          | Beschränkung in der Produktion durch externe Einflüsse als Problem von Forst- und Holzwirtschaft<br>DM 12.50                            |
| Nr. 53 | 1982 | H. RODENKIRCHEN                     | Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf die Bodenvegetation eines ehemals streugenutzten Kiefernstandortes in der Oberpfalz<br>DM 22.-- |
| Nr. 54 | 1983 | KOLLOQUIUM                          | Möglichkeiten der Stabilisierung des Rohholzmarktes als Problem von Forst- und Holzwirtschaft                                           |
| Nr. 55 | 1983 | H.-U.GROSSE                         | Untersuchungen zur künstlichen Verjüngung des Bergmischwaldes<br>DM 19.--                                                               |
| Nr. 56 | 1983 | W. MERGNER                          | Einfluß des Schalenwildes auf die bäuerliche Waldwirtschaft<br>DM 20.-- - vergriffen -                                                  |

|        |      |                                           |                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------|------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nr. 57 | 1983 | E. KENNEL                                 | Waldschadensinventur Bayern 1983<br>- Verfahren und Ergebnisse -<br>DM 15.--                                                                                                                                                    |
| Nr. 58 | 1984 | K. UEBELHÖR                               | Struktur und Dynamik von Nothofagus-<br>Urwäldern in den valdivianischen Anden<br>Chiles<br>DM 20.--      - vergriffen -                                                                                                        |
| Nr. 59 | 1984 | C.-Th. BUES                               | Radiodensitometrische Untersuchungen der<br>Variation von Jahrringbreite und Holzdichte<br>in südafrikanischen Pinus radiata-Beständen<br>unter dem Einfluß des Klimas und<br>verschiedener Durchforstungsmaßnahmen<br>DM 12.50 |
| Nr. 60 | 1984 | KOLLOQUIUM                                | Der Holzaußenhandel als Problem von<br>Forst- und Holzwirtschaft<br>DM 11.50                                                                                                                                                    |
| Nr. 61 | 1984 | R. MOSANDL                                | Löcherhiebe im Bergmischwald.<br>Ein waldbauökologischer Beitrag zur<br>Femelschlagverjüngung in den Chiemgauer<br>Alpen<br>DM 25.--                                                                                            |
| Nr. 62 | 1984 | G. MAIER                                  | Aufnahme und Auswertung von<br>Fichtenbeobachtungsflächen in Bayern<br>- Ein Beitrag zur Dynamik des derzeitigen<br>Fichtensterbens -<br>DM 10.--                                                                               |
| Nr. 63 | 1985 | E.-M. MÖSSMER                             | Einflußfaktoren für die Blaikenerosion<br>auf beweideten und aufgelassenen Almflächen<br>im kalkalpinen Bereich der Landkreise<br>Miesbach und Rosenheim<br>DM 12.50                                                            |
| Nr. 64 | 1985 | E. KENNEL<br>G. ZWIRGLMAIER               | Waldschadensinventur Bayern 1984<br>DM 20.--                                                                                                                                                                                    |
| Nr. 65 | 1985 | H. PRETZSCH                               | Wachstumsmerkmale süddeutscher Kiefern-<br>bestände in den letzten 25 Jahren<br>DM 15.--                                                                                                                                        |
| Nr. 66 | 1985 | KOLLOQUIUM                                | Forderungen an eine Bundeswaldinventur<br>aus der Sicht von Forst- und Holzwirtschaft<br>DM 10.--                                                                                                                               |
| Nr. 67 | 1985 | G. ZWIRGLMAIER<br>H. LÖFFLER<br>W. PATZAK | Struktur und Frühinvalidität der<br>Waldarbeiterschaft der Bayerischen<br>Staatsforstverwaltung<br>DM 15.--                                                                                                                     |

- Nr. 68 1985 E. REIGBER Forstliche Bioindikatoruntersuchungen  
in Bayern - Methodik und erste Ergebnisse  
1981/1982 -  
DM 20.--
- Nr. 69 1986 G. BRAUN Forstliche Bioindikatoruntersuchungen  
E. REIGBER in Bayern (2)  
H. TRÄNKNER - Die Kombination von Luftbildauswertung  
und Bioindikatoruntersuchung, dargestellt  
am Beispiel Oberallgäu 1983 -  
DM 20.--
- Nr. 70 1986 E. KENNEL Waldschadensinventur Bayern 1985  
A. REITTER DM 12.--
- Nr. 71 1986 R. PLOCHMANN Schadereignisse in den Wäldern Bayerns  
Ch.HIEKE DM 15.--
- Nr. 72 1986 KOLLOQUIUM Produktionsziele, Zielsortimente und  
Rohholzvermarktung aus der Sicht von  
Forst- und Holzwirtschaft  
DM 10.--
- Nr. 73 1986 R. MÖSSMER Verteilung der neuartigen Waldschäden an  
der Fichte nach Bestandes- und Standorts-  
merkmalen in den Bayerischen Alpen  
DM 15.--
- Nr. 74 1986 R. AMTMANN Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen  
DM 20.--



## Lebenslauf

Name: Richard Amtmann

Akad. Grad: Diplom-Meteorologe

Geburtstag und -ort: 6. März 1956 in Memmingen

Eltern: Vater: Leonhard Amtmann  
Mutter: Georgine Amtmann, geb. Zettler

Schulbildung: 1962-1966 4 Klassen Grundschule in  
Memmingen  
1966-1975 9 Klassen Bernhard-Strigel-  
Gymnasium in Memmingen

Studium: 1975-1976 1 Semester Physik an der  
Universität München  
1976-1981 11 Semester Meteorologie an  
der Universität München

Wiss. Tätigkeit 1.9.1981-14.3 1982 vollbe. wiss. Hilfs-  
kraft am Lehrstuhl für Bio-  
klimatologie und Angewandte  
Meteorologie (= LfBAM) der  
Universität München  
15.3.1982-31.3.1986 wiss. Angestellter  
am LfBAM  
ab 1.4.1986 Referendar beim Deutschen  
Wetterdienst

Prüfungen: 1975 Abitur  
1981 Diplom in Meteorologie









